

CAD/CAM/CAE工程应用丛书

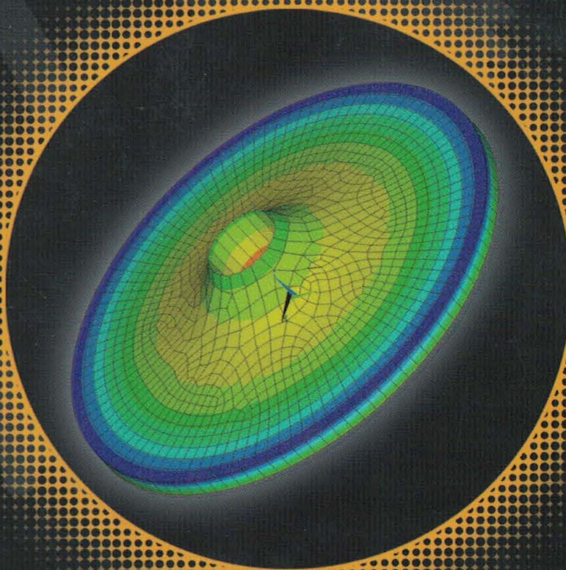
ANSYS系列

ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答

张洪才 等编著

本书核心内容包含

- 流体压力渗透载荷
- 超弹密封垫分析
- 变厚度圆盘的有限元分析
- 汽车制动器尖叫的有限元分析
- 梁框架结构的有限元分析
- 热障涂层的热应力分析
- 拉伸颈缩有限元分析
- 三维复合裂纹的有限元分析
- 印制电路板装配体的PSD分析
- 金属杆冲击刚性墙分析
- 搅拌摩擦焊接模拟
- 汽车橡胶罩的非线性分析





附赠超值 DVD 光盘

范例素材+视频讲解









机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

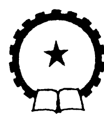
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 · ANSYS 系列

ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答

张洪才　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以有限元分析软件 ANSYS 14.0 为平台，工程实例为载体，详细地讲解了静力学、动力学、材料非线性、接触分析、屈曲分析、断裂力学、复合材料、热-结构分析的步骤和方法。书中给出了 18 个具有工程背景的实例。

本书具有以下特点：实例工程背景强，理论与软件操作结合紧密，并详细讲解软件使用过程中的常见问题，能够快速提高读者的工程实例分析能力；切实从读者学习和使用的实际出发，安排章节顺序和内容；图文并茂，讲述过程中结合大量分析实例，力求易于理解并方便学习和实践。本书配套光盘提供了 18 个实例的视频教程和 ANSYS 实例文件。

本书不仅适合高等学校理工类高年级本科生或研究生学习 ANSYS，还可供从事结构分析的工程技术人员参考使用，同时书中提供的大量实例也可供高级用户参考。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答 / 张洪才等编著. —北京：机械工业出版社，2013.4

（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列）

ISBN 978-7-111-41679-1

Ⅰ. ①A…　Ⅱ. ①张…　Ⅲ. ①有限元分析－应用软件　Ⅳ. ①0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 038886 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦
责任编辑：张淑谦
责任印制：邓　博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·24.75 印张·612 千字

0001－4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-41679-1

ISBN 978-7-89433-855-6（光盘）

定价：69.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务

社服务中心：（010）88361066　　教材网：http://www.cmpedu.com

销售一部：（010）68326294　　机工官网：http://www.cmpbook.com

销售二部：（010）88379649　　机工官博：http://weibo.com/cmp1952

读者购书热线：（010）88379203　　**封面无防伪标均为盗版**

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及到机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节约大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER/Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

ANSYS 是目前国内外使用最广泛的计算机辅助分析软件之一，经过 40 多年的发展，其强大的求解功能和良好的用户界面深受广大用户的欢迎。ANSYS 软件是一个集结构、热、流体、电磁和声学于一体的大型通用有限元分析软件，该软件很好地实现了前、后处理，分析求解及多场耦合分析统一数据库功能。同时，它还是世界上第一个通过 ISO9001 质量认证的分析设计类软件。ANSYS 软件可广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、材料成形、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究等领域。ANSYS 14.0 是目前最新的 ANSYS 版本，不仅为当前的商业应用提供了新技术，而且在以下方面取得了显著进步：放大工程、模拟最复杂的工程产品和高性能计算（HPC）。

本书以工程实例为载体，向读者详细讲解了 ANSYS 的静力学、动力学、材料非线性、接触分析、屈曲分析、断裂力学、复合材料、热-结构分析的步骤和方法，并详细讲解了 ANSYS 使用过程中常见的问题。全书内容全面新颖，理论与实践操作有机结合，并能做到以理论指导软件操作，让用户不但知道如何操作，而且知道为什么这样操作。本书实例工程背景强，讲述循序渐进，应用领域广泛。通过学习，读者可逐步提高自身的 ANSYS 操作水平及利用有限元分析理论进行结构分析的能力，最终具备在结构分析领域解决实际工程问题的思路、方法和能力。

本书几乎涵盖了 ANSYS 应用的所有分析类型，读者阅读完本书就能够使用 ANSYS 进行产品分析。本书编写时采用了目前最新的 ANSYS 14.0 版本，所涉及的知识也都是基于最新版本进行介绍的，在讲解分析过程中，结合了图形用户界面（GUI）操作和命令行操作两种模式，读者可以根据自己的需要进行选择。

全书共 21 章，18 个工程实例，覆盖了大部分工程问题，也详细地讲解了一些热门问题，如切削分析、三维裂纹、热障涂层、轮胎与路面动态接触分析、搅拌摩擦焊接模拟、金属塑性成型、网格重分，并配有详细的讲解视频教程，可以帮助读者在短时间内掌握这些复杂问题的分析流程和技巧，领会到实际工程问题的分析思路，并能解决相关领域的问题。

本书适合于初、中级用户入门与提高阶段使用。全书主要由长春装甲兵技术学院张洪才撰写，参加本书编写的还有长春装甲兵技术学院的刘宪伟、王海鹏、程华、钱永产、尹奇、金顶云和黄健，白城兵器试验中心的蒋陆德，中国北方车辆研究所的邢彦斌。编者长期从事 CAE 的研究工作，并根据自己的研究工作整理完成本书内容。本书在编写过程中参考了很多宝贵的文献，编者对文献作者表示真心的感谢。同时作者向所有参与和关心本书出版的领导、老师、亲人和朋友致以诚挚的谢意！由于时间仓促，难免在写作方式和内容上存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

编　者

目 录



出版说明
前言
第 1 章 重分网格技术 1
1.1 重分网格的优点和限制 1
1.1.1 重分网格的优点 1
1.1.2 重分网格的限制 1
1.2 重分网格的要求 2
1.3 确定开始重分网格的子步 3
1.4 开始重分网格 3
1.5 选择重分网格区域 4
1.6 执行重分网格操作 5
1.6.1 选择重分网格方法 5
1.6.2 网格控制 11
1.6.3 在同一子步网格重画多个区域 11
1.7 检查施加的接触边界、载荷和边界条件 12
1.7.1 接触边界 12
1.7.2 压力和连续位移 12
1.7.3 力和独立的位移约束 13
1.7.4 节点温度 13
1.7.5 其他边界条件和载荷 13
1.8 自动映射变量和平衡残差 13
1.8.1 映射求解变量 13
1.8.2 平衡残余力 13
1.8.3 映射结果的含义 15
1.8.4 处理收敛困难 15
1.9 执行多重启动 15
1.10 重复执行重分网格操作 15
1.11 后处理重分网格的结果 16
1.11.1 数据库后处理 16
1.11.2 时间历程后处理器 17
第 2 章 流体压力渗透载荷 18
2.1 施加流体渗透载荷 18
2.2 指定流体渗透开始点 19
2.3 指定压力渗透准则 20
2.4 指定流体渗透作用时间 20

2.5 重新定义或修改压力渗透载荷 …… 21
2.6 后处理流体压力渗透载荷 …… 22
第 3 章 基于重分网格的密封圈大变形分析 …… 23
3.1 引言 …… 23
3.2 几何模型 …… 23
3.3 材料模型 …… 23
3.4 单元的选择 …… 24
3.5 边界条件和载荷 …… 24
3.6 GUI 操作 …… 24
3.6.1 前处理 …… 24
3.6.2 求解 …… 29
3.6.3 后处理 …… 34
3.7 命令流 …… 35
第 4 章 超弹密封垫分析 …… 37
4.1 引言 …… 37
4.2 几何模型 …… 37
4.3 材料本构模型 …… 38
4.4 单元的选择 …… 38
4.5 边界条件和载荷 …… 39
4.6 GUI 操作 …… 39
4.6.1 前处理 …… 39
4.6.2 求解 …… 45
4.6.3 后处理 …… 51
4.7 命令流 …… 52
第 5 章 金属塑性成型的非线性有限元分析 …… 55
5.1 引言 …… 55
5.2 几何模型 …… 55
5.3 材料的本构关系 …… 55
5.4 单元的选择 …… 56
5.5 边界条件和载荷 …… 56
5.6 GUI 操作 …… 56
5.6.1 前处理 …… 56
5.6.2 求解 …… 61
5.6.3 后处理 …… 71
5.7 命令流 …… 73
第 6 章 功能梯度材料静、动态断裂力学分析 …… 77
6.1 引言 …… 77
6.2 几何模型 …… 77
6.3 材料的本构模型 …… 78



6.4　单元的选择 ······ 78
6.5　边界条件与载荷 ······ 78
6.6　GUI 操作 ······ 79
6.6.1　前处理 ······ 79
6.6.2　静态断裂力学求解 ······ 83
6.6.3　静态求解后处理 ······ 86
6.6.4　动态断裂力学求解 ······ 90
6.6.5　动态求解后处理 ······ 96
6.7　命令流 ······ 98
6.7.1　静态分析命令流 ······ 98
6.7.2　动态分析命令流 ······ 101
第 7 章　变厚度圆盘的有限元分析 ······ 106
7.1　引言 ······ 106
7.2　几何模型 ······ 106
7.3　材料的本构关系 ······ 107
7.4　单元的选择 ······ 107
7.5　边界条件与载荷 ······ 107
7.6　GUI 操作 ······ 107
7.6.1　前处理 ······ 107
7.6.2　求解 ······ 113
7.6.3　后处理 ······ 115
7.7　命令流 ······ 116
第 8 章　汽车制动器尖叫的有限元分析 ······ 119
8.1　引言 ······ 119
8.2　几何模型 ······ 120
8.3　材料的本构模型 ······ 120
8.4　单元的选择 ······ 120
8.5　边界条件与载荷 ······ 120
8.6　GUI 操作 ······ 121
8.6.1　前处理 ······ 121
8.6.2　求解 ······ 125
8.6.3　后处理 ······ 130
8.7　命令流 ······ 130
第 9 章　纤维缠绕复合材料压力容器的可靠性分析 ······ 136
9.1　引言 ······ 136
9.2　几何模型 ······ 136
9.3　材料的本构模型 ······ 137
9.4　复合材料压力容器的失效参数 ······ 137
9.5　单元的选择 ······ 138

9.6 边界条件与载荷 139
9.7 GUI 操作 139
9.7.1 前处理 139
9.7.2 求解 145
9.7.3 后处理 148
9.8 命令流 149
第 10 章 梁结构的有限元分析 153
10.1 引言 153
10.2 几何模型 153
10.3 材料的本构模型 154
10.4 单元的选择 154
10.5 边界条件与载荷 154
10.6 GUI 操作 154
10.6.1 前处理 154
10.6.2 求解 156
10.6.3 后处理 160
10.7 命令流 161
第 11 章 热障涂层的热应力分析 164
11.1 引言 164
11.2 几何模型 164
11.3 材料的本构模型 165
11.3.1 陶瓷层的本构关系 165
11.3.2 粘结层和基体本构关系 166
11.4 单元的选择 166
11.5 边界条件及载荷 166
11.6 GUI 操作 166
11.6.1 前处理 166
11.6.2 求解 171
11.6.3 后处理 176
11.7 命令流 178
第 12 章 拉伸颈缩有限元分析 185
12.1 引言 185
12.2 几何模型 185
12.3 材料的本构关系 185
12.4 单元的选择 185
12.5 边界条件及载荷 185
12.6 GUI 操作 186
12.6.1 前处理 186
12.6.2 求解 188



12.6.3 后处理 …… 191

12.7 命令流 …… 192

第 13 章 三维复合裂纹的有限元分析 …… 195

13.1 引言 …… 195

13.2 几何模型 …… 195

13.3 材料的本构模型 …… 196

13.4 单元的选择 …… 196

13.5 边界条件与载荷 …… 196

13.6 GUI 操作 …… 196

13.6.1 前处理 …… 196

13.6.2 求解 …… 200

13.6.3 后处理 …… 203

13.7 命令流 …… 205

第 14 章 印制电路板装配体的 PSD 分析 …… 208

14.1 引言 …… 208

14.2 几何模型 …… 208

14.3 材料的本构模型 …… 209

14.4 单元的选择 …… 209

14.5 边界条件和载荷 …… 209

14.6 GUI 操作 …… 210

14.6.1 前处理 …… 210

14.6.2 模态分析 …… 216

14.6.3 谐响应分析 …… 217

14.6.4 谱分析 …… 220

14.6.5 后处理 …… 223

14.7 命令流 …… 225

第 15 章 加强筋板的屈曲和后屈曲分析 …… 230

15.1 引言 …… 230

15.2 几何模型 …… 230

15.3 材料的本构关系 …… 231

15.4 单元的选择 …… 231

15.5 边界条件及载荷 …… 231

15.6 GUI 操作 …… 231

15.6.1 前处理 …… 231

15.6.2 静力学求解 …… 235

15.6.3 特征值屈曲分析 …… 237

15.6.4 添加初始缺陷 …… 238

15.6.5 非线性屈曲分析 …… 238

15.6.6 后处理 …… 241

15.7 命令流 ······ 244
第 16 章 切削过程模拟 ······ 248
16.1 引言 ······ 248
16.2 几何模型 ······ 248
16.3 材料的本构关系 ······ 249
16.4 单元的选择 ······ 249
16.5 边界条件及载荷 ······ 249
16.6 GUI 操作 ······ 249
16.6.1 前处理 ······ 249
16.6.2 求解 ······ 255
16.6.3 后处理 ······ 257
16.7 命令流 ······ 258
第 17 章 金属杆冲击刚性墙分析 ······ 263
17.1 引言 ······ 263
17.2 几何模型 ······ 263
17.3 材料的本构关系 ······ 263
17.4 单元的选择 ······ 264
17.5 边界条件及载荷 ······ 264
17.6 GUI 操作 ······ 264
17.6.1 前处理 ······ 264
17.6.2 求解 ······ 267
17.6.3 后处理 ······ 271
17.7 命令流 ······ 273
第 18 章 汽车充气轮胎与地面接触的有限元分析 ······ 276
18.1 引言 ······ 276
18.2 几何模型 ······ 276
18.3 材料的本构模型 ······ 276
18.3.1 轮胎的本构模型 ······ 276
18.3.2 轮胎内空气的本构模型 ······ 277
18.3.3 轮胎内强化纤维的本构关系 ······ 277
18.4 单元的选择 ······ 277
18.5 边界条件和载荷 ······ 277
18.6 GUI 操作 ······ 277
18.6.1 前处理 ······ 277
18.6.2 求解 ······ 287
18.6.3 后处理 ······ 291
18.7 命令流 ······ 293
第 19 章 搅拌摩擦焊接模拟 ······ 300
19.1 引言 ······ 300



19.2　几何模型……300
19.3　材料的本构模型……301
19.4　单元的选择……301
19.5　边界条件和载荷……301
19.5.1　热边界条件……301
19.5.2　力学边界条件……302
19.5.3　载荷……302
19.6　GUI 操作……303
19.6.1　前处理……303
19.6.2　求解……310
19.6.3　后处理……316
19.7　命令流……319
第 20 章　汽车橡胶罩的非线性分析……327
20.1　引言……327
20.2　几何模型……327
20.3　材料的本构模型……327
20.4　单元的选择……327
20.5　边界条件和载荷……328
20.5.1　边界条件……328
20.5.2　载荷……328
20.6　GUI 操作……328
20.6.1　前处理……328
20.6.2　求解……334
20.6.3　后处理……338
20.7　命令流……339
第 21 章　ANSYS 常见问题解答……343
21.1　ANSYS 的单位制……343
21.2　前处理中的常见问题……344
21.2.1　坐标系问题……344
21.2.2　函数加载问题……348
21.2.3　约束方程……351
21.2.4　载荷步、子步和平衡迭代……353
21.2.5　斜坡载荷与阶跃载荷……353
21.3　材料非线性分析中的常见问题……354
21.3.1　激活材料非线性的方法……354
21.3.2　材料模型分类简介……355
21.4　接触分析中的常见问题……357
21.4.1　接触分析关键字详解……357
21.4.2　接触分析实常数详解……359

21.4.3 接触对的正确法向 …… 366
21.4.4 接触算法简介 …… 366
21.5 动力学分析常见问题 …… 367
21.5.1 动力学分析类型作用和联系 …… 367
21.5.2 动力学基本方程 …… 367
21.5.3 模态分析中的常见问题 …… 368
21.5.4 谐响应分析中常见问题 …… 370
21.5.5 瞬态动力学分析中常见问题 …… 372
21.5.6 谱分析中常见问题 …… 373
21.6 后处理中常见问题 …… 375
21.6.1 输出应力的含义 …… 375
21.6.2 常用强度理论 …… 377
21.6.3 失效准则 …… 379
21.6.4 单元表 …… 381

第 1 章　重分网格技术



在有限变形的大变形分析中，网格畸变会降低模拟精度，引起收敛困难，并最终终止分析。ANSYS 提供的重分网格技术允许用户对发生畸变的网格区域重新划分网格并继续前面的模拟。该技术在工程设计中得到了广泛的应用，为此本章将为用户详细讲解该技术的使用方法。

重分网格计算要求 ANSYS 更新数据库，必要时还会生成接触单元，从原来的网格向新网格传递边界条件和载荷，并自动地将所有的求解变量（节点解和单元解）映射到新网格上。通过映射变量达到力平衡，然后用新网格继续求解。

1.1　重分网格的优点和限制

1.1.1　重分网格的优点

即使一个分析由于严重的网格畸变而面临终止，重分网格技术仍然允许用户继续分析并完成计算。用户也可以使用重分网格技术来提高分析精度并加快收敛速度。

1.1.2　重分网格的限制

重分网格的目的是修复发生畸变的网格，解决网格畸变所引起的收敛困难。然而，重分网格仅对网格因变形过大产生的不均匀变形引起的畸变有效，对其他原因引起的求解不收敛没有帮助（如不稳定的材料、不稳定的结构或不稳定的数值计算）。

1．不稳定的材料

绝大多数非线性材料模型，尤其是超弹性材料，都有自己的使用范围。当变形量或应力超过了它们的使用范围时，材料会变得不稳定。这种不稳定表现为网格的畸变，但重分网格对这种情况没有帮助。可以通过检查应变值、应力值和计算收敛来确定材料什么时候不稳定。计算收敛突然变得困难意味着材料不再稳定。当超弹性材料变得不稳定时，ANSYS 会在求解开始时弹出警告对话框，但这种警告仅适用于简单应力的情况。

2．不稳定的结构

对于一些几何体和载荷，变形可能引起“突跳”（突弹跳变）或局部曲屈，这种现象也表现为网格畸变，但重分网格不能修复这种网格畸变。一般通过仔细检查变形区或时间—载荷曲线很容易发现这种网格畸变。

3．不稳定的数值计算

当问题接近过渡约束时，数值计算将发生不稳定情况。约束包括运动约束，如：施加位移、CP、CE 和混合 u-P 单元的完全不可压缩材料引入的体积约束。在很多情况下，数值不稳定情况出现在分析前期。

对于一个成功的重分网格操作，新网格应该比旧网格的质量好。如果新网格的质量没有旧网格好，重分网格操作不但不能改变问题的收敛性，而且可能让问题的收敛更加困难。

1.2 重分网格的要求

在 ANSYS 14.0 中重分网格技术支持二维和三维分析，重分网格计算要求所有的多帧重启文件可用。表 1-1 给出了支持重分网格的分析类型、单元、材料、载荷、边界条件和其他重分网格的要求。

表 1-1 重分网格计算的基本要求

支持的种类	要　　求
实体单元	（1）PLANE182 只能使用 B-bar (KEYOPT(1) = 0) （2）PLANE183 没有要求 （3）PLANE182 和 PLANE183 都可以使用全应力状态(KEYOPT(3))；平面应力；平面应变、轴对称分析和一般平面应变。同时也能使用纯位移设置(KEYOPT(6) = 0)或 u-P 混合设置(KEYOPT(6) = 1) （4）SOLID185 仅能使用 B-bar 方法（KEYOPT(1) = 0）。在非复合材料模型中，也可以使用纯位移公式（KEYOPT(6) = 0）或 u-p 混合公式（(KEYOPT(3) = 0) （5）SOLID285 没有要求
接触单元	（1）TARGE169 （2）CONTA171 和 CONTA172 拥有下列任何一种有效的 KEYOPT 设置： KEYOPT (1) = 0 KEYOPT (2) = 0, 1, 3, 4 KEYOPT (3) = 0 KEYOPT (4) = 0, 1, 2 KEYOPT (5) = 0, 1, 2, 3, 4 KEYOPT (7) = 0, 1, 2, 3 KEYOPT (8) = 0 KEYOPT (9) = 0, 1, 2, 3, 4 KEYOPT (10) = 0, 1, 2, 3, 4, 5 KEYOPT (11) = 0 KEYOPT (12) = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 KEYOPT(14) = 0 （3）TARGE170 （4）CONTA173 和 CONTA174 拥有下列任何一种有效的 KEYOPT 设置： KEYOPT (1) = 0 KEYOPT (2) = 0, 1 KEYOPT (4) = 0, 2 KEYOPT (5) = 0, 1, 2, 3, 4 KEYOPT (7) = 0, 1, 2, 3 KEYOPT (8) = 0 KEYOPT (9) = 0, 1, 2, 3, 4 KEYOPT (10) = 0, 2 KEYOPT (11) = 0 KEYOPT (12) = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 KEYOPT(14) = 0
接触对行为	（1）刚-柔接触——目标单元和控制节点不能重分网格 （2）柔-柔接触 （3）自接触
材料	除了铸铁（cast iron）、混凝土（concrete）、微平面（microplane）、形状记忆合金（shape memory alloy）和膨胀材料（swelling）外，其他材料模型都支持重分网格技术
分析类型	静态几何非线性分析（NLGEOM,ON 和 SOLCONTROL,ON）
载荷和边界条件	（1）位移、力、压力和节点温度 （2）不支持通过表面效应加载 （3）支持表格位移和力 （4）仅支持表格压力是时间的函数的情况

（续）

支持的种类	要　　求
局部重分网格	（1）区域中被选择的节点必须有相同的节点坐标系 （2）边界处的节点可以有不同的节点坐标系 （3）单元必须具有相同的单元类型、材料属性、单元坐标系和实常数 （4）如果要求重分网格的两个区域有不同的属性，用户必须对这两个区域单独操作
文件	.rdb、.rst、.rxxx、.ldhi 和.cdb

注：该表格所列出的要求，仅用于重分网格的区域。



1.3　确定开始重分网格的子步

如果求解由于网格发生畸变而中断计算，则使用重分网格技术解决这类问题是非常合适的。选择一个重分网格的合适子步非常关键。用户必须选择一个重启文件可用的收敛子步，可以将收敛的最后一个子步选择为重分网格的起始子步，因为这样可以减少剩余计算的载荷步。然而收敛的最后一个子步中单元可能会产生更严重的畸变，将导致映射结果参数（MAPSOLVE）产生更大的错误，反过来需要更多的映射子步来平衡残余力，甚至将导致计算不收敛。在网格畸变极其严重的子步中，重分网格技术有可能会降低最后计算结果的精度，甚至会导致自动传递边界条件失败。

最适当的方法是选择最后收敛子步前 1、2 或 3 个子步。可以通过通用后处理查看变形单元和应力应变分布，来确定最适当的重分网格起始子步。

如果在结果文件中没有某个子步的数据，用户可以利用 ANSYS 的重启特征生成该子步的结果数据，然后进入 POST1 模块检查单元变形；之后，重新进入求解模块并开始重分网格。

如何选出最适当的子步开始重分网格？下面给出几点建议。

- 在该子步中，网格发生明显畸变但不存在内角较小的单元，即等于或超过 180°的单元。
- 在该子步中，接触状态具有最小的渗透。尽量避免使用那些接触状态从前一子步到当前子步发生突变的子步。
- 当重分网格后（REMESH,FINISH），ANSYS 在传递边界条件和载荷的过程中，如果出现错误，并且旧网格发生严重的畸变，则可尝试选择更前面的子步。
- 最好的子步不总是最后收敛的子步，而是最后子步前面的几个子步。
- 如果最后几个收敛子步的时间间隔非常小并且已经试了一个或多个其中的子步仍然不成功的话，可以选择距离其他子步时间间隔较大的子步。
- 由于旧网格畸变太严重，很难获得合理的网格质量，可以尝试选择更前面的子步。
- 若用户使用了 500 个子步，映射操作（MAPSOLVE）仍然收敛失败，则建议用户尝试选择更前面的子步。

1.4　开始重分网格

重分网格是基于已经存在的求解进行的，因此最初的计算求解必须中断。因为计算求解中断，所以重分网格过程必须从清除数据开始。



为了开始重分网格，需要进行以下操作。

1）清除数据库（/CLEAR）。

2）重新进入求解器（/SOLU）。

3）开始重分网格，在重分网格区域指定载荷步和子步。

命令：REZONE

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Start，弹出开始重分网格设置面板，如图 1-1 所示。使用该面板可以选择与载荷步相关联的子步来开始重分网格，并且可以通过单击“查看几何体变形”（View Deformed Geometry）按钮来观察当前子步模型的变形情况，选择好子步后，单击“OK”按钮。

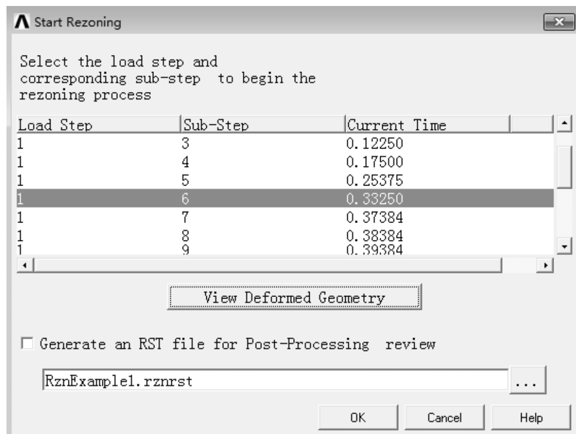


图 1-1　开始重分网格设置面板

1.5　选择重分网格区域

选择进行重分网格的区域应该能够包括整个或部分变形区域，被选择区域单元具有下列相同的地方。

- 材料类型。
- 单元类型（包括坐标系和关键字的设置）。
- 平面应变单元的厚度（实常数）。
- 节点坐标系（除边界节点外，边界节点可以有不同的节点坐标系）。

所选区域应该包含所有的高度扭曲单元。选择的单元应比发生扭曲的目标单元数量稍多一些，以便新网格能够确保界面边界上的节点能够有较好的分布。如果边界节点分布太不均匀，附着这些节点的单元应该包括在所选区域内。选择区域内的边界可以有各种形状。

选择区域太大可能导致映射错误和需要消耗更多的时间。如果选择区域太小则不能包括所有高度扭曲的网格区域，重分网格后的新模型可能没有足够的网格质量达到收敛性。该步骤不支持命令，只支持 GUI 操作：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Select Rezone Elements，弹出选择重分网格单元消息面板，如图 1-2 所示。要求使用选择工具去选择重分网格区域的单元，单击“OK”按钮，会弹出选择工具面板，可根据需要进行选择。

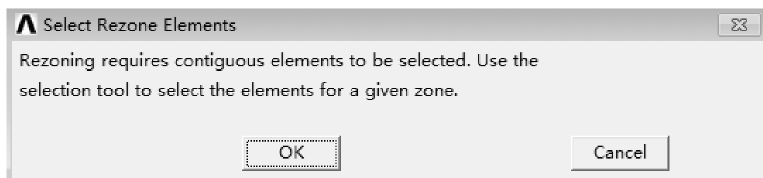


图 1-2 选择重分网格单元消息面板

选择单元并创建组，在重分网格的过程中，重分网格开始（REMESH,START）后，输入组名。

1.6 执行重分网格操作

1.6.1 选择重分网格方法

1．使用程序产生新网格进行重分网格（2-D）

（1）创建一个面进行重分网格

在选择区域的基础上，用 AREMESH 命令创建一个面并在其上生成新的网格。ANSYS 确认被选择重分网格区域并在该区域为重分网格创建新的面。ANSYS 同时也维持该区域与其相邻区域的兼容性，且节点上的载荷和边界条件保持不变。

ANSYS 通过创建新的边界线来影响面上网格质量和网格密度。因此，必须谨慎使用 AREMESH 命令。边界线是以所选区域边界上单元的边为基础。

- 线合并（AREMESH,0）允许用户重新分配边界上的节点并控制新单元的尺寸，新单元可以比原来的单元大或小。但如果边界是高度弯曲的，新单元的边可能构成稍微不同的边界。
- 如果线段没有合并（AREMESH,-1），则新边界将与旧边界相匹配。在这种情况下，用户不能控制边界上旧节点的位置，且边界上的单元只能不大于原单元的大小。

为了保持兼容性，ANSYS 不将线段与所选重分网格区域单元边界线结合（即使指定要结合线）。如果有旧的节点在两条线段之间，并且该节点属于下列情况，那么它们也不能结合。

- 有载荷或位移约束存在。
- 是压强、分布位移约束或接触边界的起始点。

（2）使用旧网格上的节点

建议尽量避免使用旧网格上的节点。使用旧网格上的节点生成新网格会有更多的限制，并且很难生成质量较好的新网格。

如果必要的话，可以保持被选择区域边界上的一些旧网格节点不变，并用于新网格中。为了这样做，可以在使用 AREMESH 命令之前选择这些节点并将它们创建成节点组，命名为_ndnocmb_rzn (CM,_ndnocmb_rzn,NODE)。

（3）在同一个子步重分多个区域网格的提示

当使用程序产生新网格进行重分网格时，可以在给定的一个子步中对多个区域进行重分，步骤如下。

1）开始重分网格后（REMESH,START），选择一个区域重分网格。

2）为产生新网格创建一个面（AREMESH）。

3）在这个面上划分新网格（AMESH）。

4）选择其他区域（注意不同区域不能相互重叠），创建面，生成新网格。

可以重复这个过程来重分希望重分网格的区域，但只能在执行 REMESH,START 后和执行 REMESH,FINISH 命令之前进行操作。

当重分两个相互连接的区域或面时，最好是将它们合并为一个区域。如果两个相连接的区域必须分开处理时，则可先创建一个区域的网格（AMESH），然后再重分（AREMESH）另一个区域的网格。

（4）产生新网格

在为选择区域产生面之后，输入 AMESH 命令产生新网格。只能在执行 REMESH，START 后和执行 REMESH，FINISH 命令之前，使用网格控制命令。

2．使用通用新网格进行重分网格（2-D 和 3-D）

使用通用新网格进行重分网格，该方法适用于二维和三维问题。该方法可以使用第三方网格文件，为了使用第三方网格，网格文件格式必须为.cdb。.cdb 文件必须拥有网格信息，但是不要求具有几何信息，比如代表重分网格区域边界的小面几何体可以生成一个.cdb 网格文件。

（1）使用 REMESH 命令执行通用新网格

该命令被用来读取通用新网格文件。因为 REMESH 命令中的 READ 选项仅用来读取通用网格，新网格中的实体单元将继承旧网格中实体单元所有的属性。程序会忽略.cdb 文件中新网格的实体单元属性，而是靠它们在模型中的位置来计算它们的内部属性，因此在执行 REMESH,READ 命令后，仅读取.cdb 文件中的 NBLOCK 和 EBLOCK 记录（用来定义节点坐标和单元连通性）。可以在同一个重分网格问题中多次执行 REMESH,READ 命令读入不同部分的网格。这些区域是独立的或与其他区域相互接触，但它们不能重叠。代表多个区域的新网格也能写入一个.cdb 文件。

（2）使用通用新网格的基本要求

- 新网格占据的空间能够进行几何拓扑并且与旧网格保持协调一致。
- 旧网格中承受集中力的节点必须出现在新网格中。
- 旧网格中施加压力载荷和边界条件的位置必须出现在新网格中。
- 旧网格中产生接触单元的位置必须出现在新网格中。

这些载荷、接触单元和边界条件的位置点，在二维分析中以节点进行标记而在三维分析中以一条线进行标记。

没有必要在通用新网格的.cdb 文件中指定载荷、边界条件、材料属性等。ANSYS 程序将从模型自动地分配这些值到新网格中并忽略.cdb 文件中任何指定的值。如果必要，用户可以通过增加载荷步或重启动来添加新的载荷。

ANSYS 建议用户输出变形后网格的所有离散边界条件信息，以便于第三方软件的使用，并且当生成新网格时，检查承受集中载荷的节点位置、接触/目标区域的范围、边界条件和分布载荷范围是否保留。如果这些关键节点没有保留下来，将不能继续进行分析计算。

如图 1-3 所示，即使新网格平滑的几何边界与旧网格的几何边界不完全一致，新网格也是可以使用的，但是这种几何边界的偏差必须非常小。

在包含接触的三维分析中，新网格的几何边界面与旧网格的几何边界面的偏差大小影响

映射结果的程度要高于二维分析，因此在三维网格重分中要尽量确保新旧网格几何边界的一致性。

如果重分网格的部分有接触/目标单元，ANSYS 在生成新网格时是否自动地生成这些单元取决于旧网格内的下伏单元的单元类型是否与接触/目标单元的类型相同。在模型中的单个刚性目标单元在整个分析的过程中始终保持不变并且也不能重分网格，而依附在实体单元上的所有的接触/目标单元可以重分网格。当可从.cdb 文件中读入新网格的新的接触/目标单元时，在重分网格的实体单元中读入文件比 ANSYS 生成新的接触/目标单元更快、更有效。

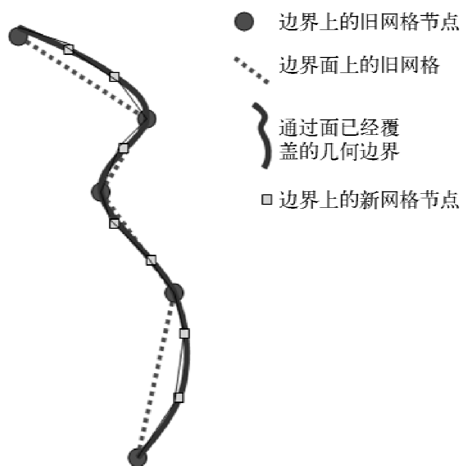


图 1-3　通用新网格光滑的几何边界

新网格的.cdb 文件在 NBLOCK 和 EBLOCK 记录中一定不能有任何断线。当在写入.cdb 文件时，块文件格式是必需的（CDWRITE…Fmat, 其中 Fmat = BLOCKED）。

（3）使用 REMESH 中的 REGE 和 KEEP 选项

REMESH 命令中的 REGE 选项将新网格中的节点和单元号在旧网格上节点和单元号的最大编号基础上进行偏置。KEEP 选项则可以保持新旧网格中的节点号和单元号不发生变化。

要谨慎使用 KEEP 选项，因为它假设：要么新网格中节点和单元编号在旧网格节点和单元最大编号的基础上已经偏置；要么新旧网格中的公用节点或单元的编号在几何上相匹配。

图 1-4 说明了 REMESH 命令中的 REGE 和 KEEP 选项是如何工作的。

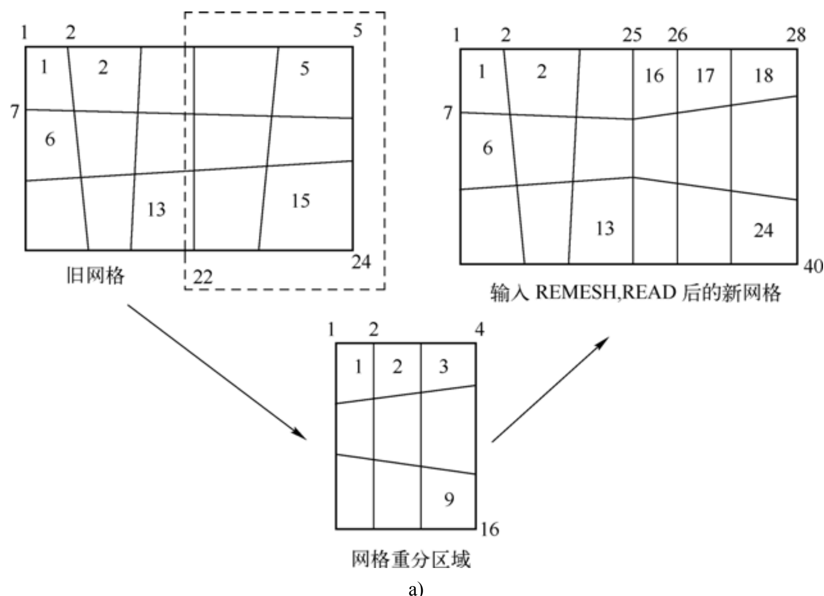
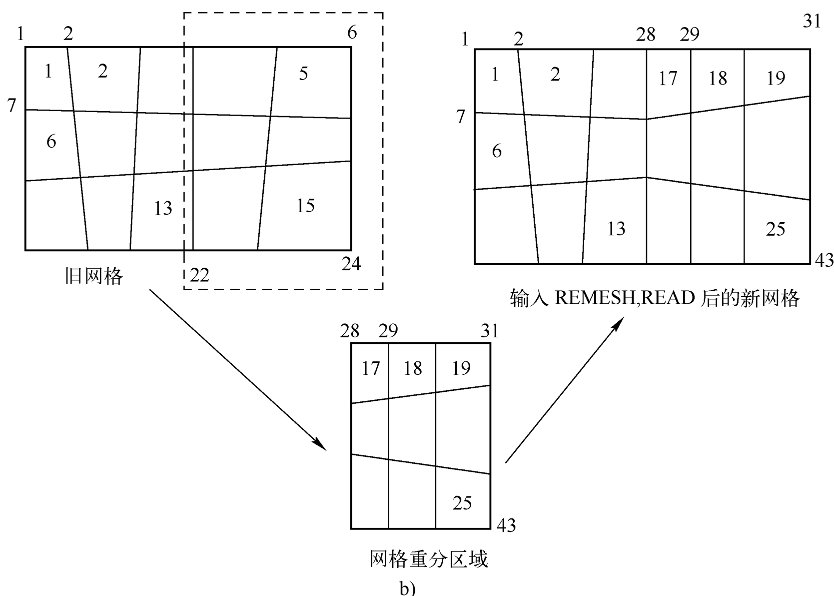


图 1-4　当使用通用新网格重分网格时的 Remeshing 选项

a) 使用 REGE 选项





b)

图 1-4　当使用通用新网格重分网格时的 Remeshing 选项（续）

b) 使用 KEEP 选项

在这个例子中，一个有 24 个节点和 15 个单元的已划分网格的区域使用 REMESH 命令中的 REGE 选项重分网格。新网格的.cdb 文件中包括 1～16 号节点和 1～9 号单元。重分网格后，这些节点和单元的编号在旧节点和单元最大编号的基础上产生了适当的偏置（分别偏置了 15 和 24）

同样的问题出现在这个例子中，然而，新网格的.cdb 文件中定义节点的编号从 28～42，单元编号从 17～25，在这种情况下，使用 REMESH 命令的 KEEP 选项重分网格，这些节点和单元编号没有偏置。

3．使用手动网格分裂进行重分网格（2-D）

由于其他原因求解无法收敛时，ANSYS 允许在重分网格的过程中手动分裂一个已存在的网格来获得非线性分析的解或改善求解精度。该重分网格计算方法仅能应用于二维问题。

网格分裂通过丰富现有的网格增加了模型的自由度。如果在存在接触间隙的情况下必须增加自由度或使用程序产生新网格与通用新网格方法都不能完全满足用户的需求，那么分裂网格对重分网格来说是非常有用的选项。

（1）理解网格分裂

分裂仅发生在网格中已选择的实体单元上。如果没有明确选择的实体单元，ANSYS 将分裂网格中所有的实体单元。只要满足重分网格条件的单元都可以使用网格分裂功能。

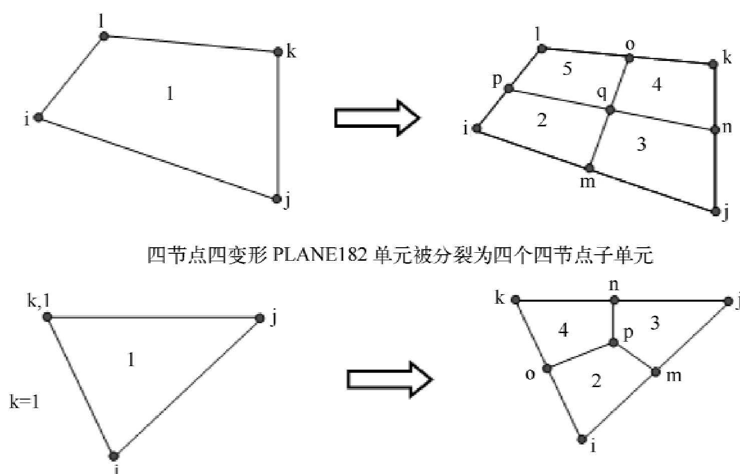
ANSYS 将父单元分裂成子单元。

- 四边形父单元分裂成 4 个四边形子单元。
- 退化的四边形父单元分裂成 3 个四边形子单元。
- 三角形父单元分裂成 4 个三角形子单元。

子单元继承父单元所有形状特点。因此，如果个别单元严重畸变且引起收敛困难，使用单元分裂来简单细分网格并不能改善收敛性。

（2）网格分裂的几何细节

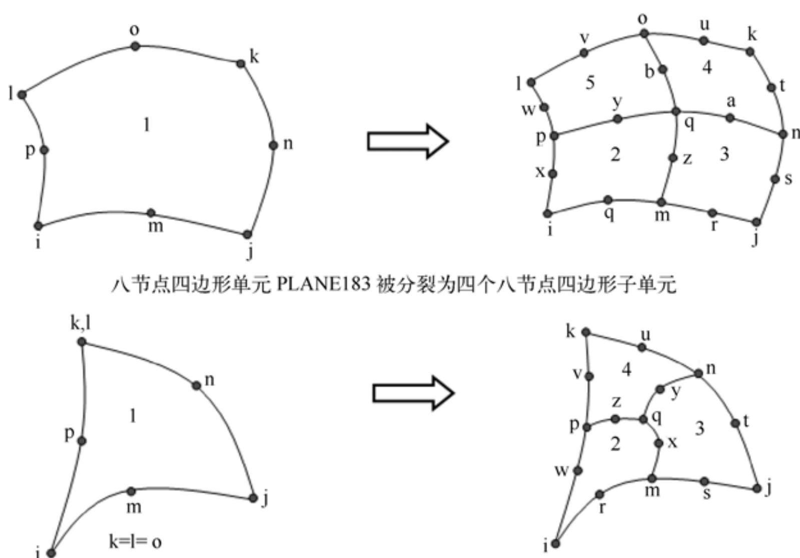
REMESH 中的 SPLIT 选项不使用几何信息，而仅使用网格信息，即节点连接和节点坐标系。所有的子单元自动地继承父单元所有的属性。四边形父单元分裂成 4 个四边形子单元，退化父单元分裂成 3 个四边形子单元，三角形父单元分裂成 4 个三角形子单元，如图 1-5 和图 1-6 所示。



四节点四变形 PLANE182 单元被分裂为四个四节点子单元

三角形单元 PLANE182 被分裂为三个四节点四边形子单元

图 1-5　四边形和退化线性 PLANE182 单元的分裂



八节点四边形单元 PLANE183 被分裂为四个八节点四边形子单元

一个三角形单元 PLANE183 被分裂为三个八节点四边形子单元

图 1-6　四边形和退化二次三角形 PLANE183 单元

（3）使用 REMESH 命令进行网格分裂

使用 ANSYS 菜单或 ESEL 命令选择重分网格的区域以便执行网格分裂命令。当用户选择了目标区域后执行 REMESH,SPLIT 命令。

用户可以在同一重分网格的区域多次执行 REMESH,SPLIT 命令对网格的不同部分进行分裂操作。这些部分可以重叠或者是相互独立的，但是大量的重叠将产生形状较差的单元。

如果重分网格的区域存在接触/目标单元，ANSYS 会在新网格上自动地生成这些单元（取决于旧网格内部单元类型是否与接触/目标单元相同）。在模型中独立的刚性目标单元在分析过程中始终保持不变并且不能重分网格；但依附在实体单元上的所有接触和目标单元可以进行重分网格操作。当分裂与接触/目标单元相关的实体单元时，ANSYS 程序会删除相关的接触/目标单元。ANSYS 会在重分网格操作结束的时候（REMESH,FINISH），自动地在新子单元上生成合适的接触/目标单元。

因为网格分裂细化计算是基于单元而不是基于几何模型进行的，因此一旦细化就不能做后退操作了。为了创建一个新的分裂规则或者要重新转换为初始网格，必须先创建一个新的网格重新划分环境（REZONE,MANUAL,LDSTEP,SBSTEP）。

（4）网格分裂的网格过渡选项

默认的 REMESH,SPLIT 命令会强制使用主四边形单元生成过渡网格并且使退化单元的数量最小化。该命令也能这样执行：

```
REMESH,SPLIT,,,TRAN,QUAD
```

执行 REMESH 命令中的过渡和四边形选项能帮助程序加快收敛，因为非退化单元不容易发生锁定行为。使用该方式生成过渡网格能均匀分布网格的位置。当从分裂区过渡时会发生单元细化并且过渡贯穿几个单元层。

如果要在分裂后生成更局部化的网格，可执行下列命令：

```
REMESH,SPLIT,,,TRAN,DEGE
```

在这种情况下，ANSYS 会在过渡区生成退化单元，并且过渡区只有一层单元。

用户在图 1-7a 中选择要分裂的单元（ESEL），默认分裂算法生成的全部是四边形网格即没有退化的单元。图 1-7b 中给出非局部化的区域。REMESH,SPLIT 命令或 REMESH,SPLIT,,,TRAN,QUAD 命令都可以在这里使用。图 1-7c 中给出的过渡区只有一层单元且没有退化的单元。在这种情况下使用 REMESH,SPLIT,,,TRAN,DEGE 命令。

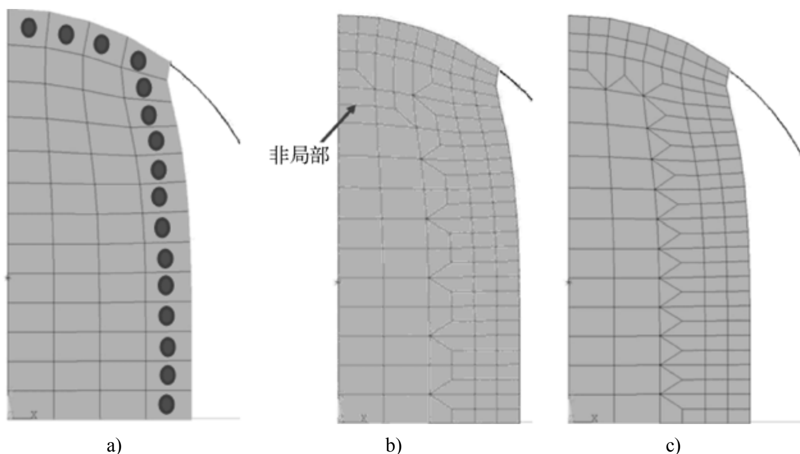


图 1-7　过渡单元产生的方法

1.6.2 网格控制

划分出一个好的网格是重分网格能否成功的关键。新网格必须比旧网格好，否则重分网格不会改善问题的收敛性，并且如果新网格的质量比旧网格更差，很可能让计算变得更难收敛。

一般情况下，好的单元网格应具有以下特点。

- 单元内角度不能等于 180°或 0°；且对四边形单元，单元内角接近于 90°；对三角表单元，单元内角接近于 60°。
- 四边形相对两边的夹角较小（接近于相互平行）。
- 边界节点分布均匀。
- 单元具有较好的长宽比。

为了生成一个好的网格，满足内部角度条件比单元长宽条件更重要。对于二维网格，尽量避免使用三角形单元；但如果四边形单元有非常大的内角，最好使用有更适宜内部角度的三角单元来代替四边形单元。对于三维网格，尽量避免使用四面体金字塔单元并尽量少使用退化单元。

新网格的质量完全取决于所选区域的形状、相邻单元、带有载荷和边界条件的边界节点。在映射操作之前，有时用户可能需要对新网格进行编辑或修改（MAPSOLVE），在这样的情况下，有几个前处理命令可用来帮助用户在所选区域生成好的网格。

表 1-2　可用于重分网格的前处理网格控制命令

网格控制的类型	可用的 ANSYS 命令
单元尺寸	AESIZE, DESIZE, ESIZE, KESIZE, LESIZE 和 SMRTSIZE
单元形状	MOPT, MSHAPE 和 MSHKEY
单元内角	用 SHPP,MODIFY 命令重新设置参数极限值，根据单元的类型，指定 11~14 和 17~18 的值
边界节点的分布	边界节点要求特别注意。在不扰乱网格其他特点的情况下，使用 LSIZE 命令尽可能得使节点的位置分布均匀
网格细化	AREFINE, EREFINE, KREFINE, LREFINE, NREFINE,
其他	ACLEAR, AMESH, KSCON, LCCALC, MSHMID 如果重分网格使用了通用新网格而不是程序产生的网格，N 和 EN 命令仍然可用 在重分网格操作的过程中，ACLEAR 的命令仅适用于通过 AREMESH 命令创建面的情况

以上命令在执行 REMESH,START 命令之后和执行 REMESH,FINISH 命令前的任何时候都可用。

在重分网格的过程中，要保留施加了力或独立位移约束的节点，如位于分布位移约束、压强或接触边界的起始点的节点。新单元和旧单元有相同的属性，如单元类型、材料、实常数和单元坐标系。ANSYS 新节点的坐标与在重分网格区域内或边界上旧节点的坐标一致，也可以根据具体情况而定。

生成新网格后，核实新单元是否覆盖整个被选区域和是否与相邻区域相容（如果另一个区域需要重分网格，你可以这样做，不需要再执行 REMESH,START 命令）。

1.6.3 在同一子步网格重画多个区域

在重分网格的过程中，允许在同一个变形域生成一个或多个区域的新网格。在同一子步

中重分两个或两个以上的区域的网格的过程叫水平划分（Horizontal rezoning）。

开始重分网格（REMESH,START）后，先选择一个区域，创建一个面（AREMESH），然后在这个面上划分新网格（AMESH）。再选择其他的区域，但不同的区域不能相互重叠，创建面，生成新网格。用户可以重复这个过程对希望重分网格的区域进行重分，但只能在执行 REMESH,START 后和执行 REMESH,FINISH 命令之前（如 The Rezoning Process）。

当重分两个相互连接的区域或面时，最好是将它们并为一个区域。如果两个相连接的区域必须分开处理，先创建一个区域的网格（AMESH），然后再重分（AREMESH）另一个区域的网格。

如果打算全部重分网格，必须使用水平划分过程，具体情况如下。

- 两个区域，有不同的材料、单元坐标系、节点坐标系或实常数。
- 单元在接触边界的两侧。
- 两个区域都有畸变分散的单元。

当重新划分网格的面之间距离比较远或有大量共享边界时，Horizontal rezoning 使用程序产生新网格或通用新网格方法，但是网格重分不能发生区域重叠。这些限制对于手动分裂方法产生新网格的方法无效。

1.7 检查施加的接触边界、载荷和边界条件

生成新网格后，退出重分网格过程。如果下伏的实体单元已经重分网格，ANSYS 程序会自动地生成接触/目标单元，然后将所有的边界条件和载荷传递到新网格。用户可以使用 plot 或 list 命令核实新生成的目标/接触单元、传递边界条件和载荷是否完全正确。

1.7.1 接触边界

因为刚性目标单元不发生变形，这些单元没有必要重分网格，程序会自动将其从旧网格映射到新网格，存在变形的目标单元和接触单元总是依附在实体单元表面。因此，如果下伏的实体单元已经重分网格，则在退出重分网格过程后，ANSYS 程序会自动生成目标/接触单元。ANSYS 程序将所有指定的单元选项、实常数和材料模型自动地传递给新单元。最后确保接触边界上的新单元完全正确。

1.7.2 压力和连续位移

在重分网格的过程中，如果使用程序生成新网格，则 ANSYS 会自动保持施加压力或连续位移约束边界上的节点不变。如果使用通用新网格生成新网格，则必须手动保持压力或连续约束边界上的节点不变。

对于二维问题，边界仅由起始和终止节点组成。对于三维问题，可以使用一排按顺序排列的节点代表一系列面的线边界。

可重新分配起点与终点之间的区域内的节点。如果这样做，ANSYS 程序将用线性插值的方法将压力和位移约束施加在新位置的节点上。如果起始节点坐标系旋转，新节点也跟着起始节点旋转相同的角度。如果原来的节点不是线性分布，线性插值可能会引起小的误差，如果旧网格和新网格都足够密，误差应该不会太大。图 1-8 给出了重分网格前后位移约束的异同。

1.7.3 力和独立的位移约束

如果力和独立的位移约束施加在一个节点上，在重分网格时，ANSYS 将保留该节点上的转动角、力和位移约束。

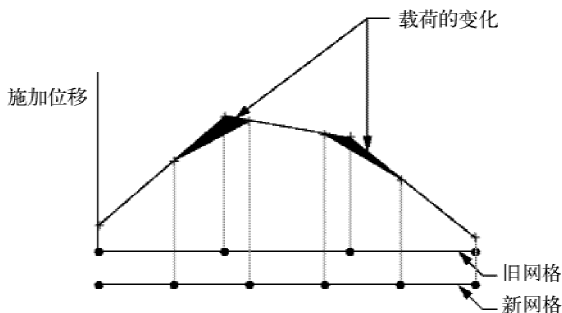


图 1-8 重分网格后前后位移约束的差异

1.7.4 节点温度

ANSYS 使用 BF 命令并使用单元的形函数插值将旧节点的温度传递给新节点。

如果重分网格的区域存在交叉边界：一边上有施加了温度载荷的旧节点而另一边上没有，插值将导致靠近边界的新节点上温度分布不同。因此，尽量避免重分网格的区域存在交叉边界，如果存在交叉边界，则可用 Horizontal rezoning 方法重分网格。

1.7.5 其他边界条件和载荷

任何其他的载荷和边界条件，如加速度、耦合和约束方程，在重分网格的区域将不可用并会在重分网格的过程中被清除，这可能导致求解不收敛或求解出的结果与预期值相差较大。

1.8 自动映射变量和平衡残差

重分网格后，使用 MAPSOLE 命令将使节点解和单元解从原网格自动映射到新网格上。映射操作会引入额外的子步来平衡残差，进而达到平衡。如果想继续进行求解，则需要在执行 REMESH,FINISH 命令后，再执行 MAPSOLVE 命令。

1.8.1 映射求解变量

在重分网格子步中，ANSYS 将结果（如节点位移、单元应力和应变）从原网格映射到新网格。映射变量必须满足应变—位移关系、本构关系和平衡方程。映射自带的算法只能处理前两个条件，但由于网格不同，映射的应力场总是不平衡的。因此，不平衡的力（残余力）必须平衡，ANSYS 是通过附加子步来进行平衡的。

1.8.2 平衡残余力

自动引入附加子步将残差减少为 0。在该阶段，时间仅增加一个非常小的量（TIME*10E-6，其中 TIME=当前载荷步）。因此，可以认为外部加载没有发生变化。

ANSYS 总是尝试在一个子步内平衡残余力。如果没有平衡，ANSYS 将采用二分法（自动选用，不需人工操作）引入更多的子步。采用一个重新平衡因子来评估平衡残差，且该因子作为二分操作的控制因子（不像标准的求解过程把时间作为控制因子）。如果控制因子为 0 意味着残差还没有平衡；如果控制因子为 1 则表明所有的残差都平衡了，即应力场已平衡。

在映射时（MAPSOLVE），可以指定最大子步数（默认值是 5），绝大多数的问题可以在几个子步内平衡残余力。如果包含接触，那么就需要更多的子步。

1．输出文件

在输出文件中，ANSYS 显示 MAPSOLVE 命令数据，如下。

```
                    S O L U T I O N   O P T I O N S

  PROBLEM DIMENSIONALITY. . . . . . . . . . . . .2-D
  DEGREES OF FREEDOM. . . . . . UX    UY    ROTZ
  ANALYSIS TYPE . . . . . . . . . . . . . . . . .STATIC (STEADY-STATE)
     MAPSOLVE FOR REZONING. . . . . . . . . . . .YES
  NONLINEAR GEOMETRIC EFFECTS . . . . . . . . . .ON
  STRESS-STIFFENING . . . . . . . . . . . . . . .ON
  EQUATION SOLVER OPTION. . . . . . . . . . . . .SPARSE
  NEWTON-RAPHSON OPTION . . . . . . . . . . . . .PROGRAM CHOSEN
  GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX . . . . . . . . . . .SYMMETRIC

                    L O A D   S T E P   O P T I O N S

  LOAD STEP NUMBER. . . . . . . . . . . . . . . .     1
  TIME AT END OF THE LOAD STEP. . . . . . . . . .  1.0000
  AUTOMATIC TIME STEPPING . . . . . . . . . . . .    ON
     INITIAL NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . . . . .    10
     MAXIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . . . . .   100
     MINIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . . . . .     5
     MAXIMUM NUMBER OF SUBSTEPS FOR MAPSOLVE. . .    50
  MAXIMUM NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS. . . .    15
  STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS . . . . . . . .    NO
  STRESS-STIFFENING . . . . . . . . . . . . . . .    ON
  TERMINATE ANALYSIS IF NOT CONVERGED . . . . . .YES (EXIT)
  CONVERGENCE CONTROLS. . . . . . . . . . . . . .USE DEFAULTS
  PRINT OUTPUT CONTROLS . . . . . . . . . . . . .NO PRINTOUT
  DATABASE OUTPUT CONTROLS
     ITEM     FREQUENCY   COMPONENT
      ALL        ALL
```

2．映射子步

映射所用的子步数显示如下。

```
*** LOAD STEP     1   SUBSTEP    10  COMPLETED.    CUM ITER =    101
*** TIME =   0.399110         REBALANCE FACTOR =   1.00000


*** ANSYS BINARY FILE STATISTICS
 BUFFER SIZE USED= 16384
        0.375 MB WRITTEN ON ELEMENT SAVED DATA FILE: RznExample.esav
        0.125 MB WRITTEN ON ASSEMBLED MATRIX FILE: RznExample.full
        0.375 MB WRITTEN ON RESULTS FILE: RznExample.rst

MAPSOLVE IS DONE SUCCESSFULLY IN    3 SUBSTEPS FOR MANUAL REZONING.
```

3．监控文件

监控文件的第 6、7 列代表每个映射子步的平衡因子（而不是时间），如下。

```
 SOLUTION HISTORY INFORMATION FOR JOB: RznExample.mntr

ANSYS RELEASE  9.0                    13:06:16    09/20/2004

 LOAD  SUB-  NO.   NO.  TOTL  INCREMENT  TOTAL      VARIAB 1  VARIAB 2  VARIAB 3
 STEP  STEP  ATTMP ITER ITER  REBALANCE  REBALANCE  MONITOR   MONITOR   MONITOR
                              FACTOR     FACTOR     CPU       MxDs      MxPl

   1      8    2     7    93  0.35000    0.35000    5.4300    -.64291   0.78886E-30
   1      9    1     4    97  0.35000    0.70000    8.0600    -.81383   0.78886E-30
   1     10    1     4   101  0.30000     1.0000    11.260    -.93615   0.78886E-30
```

尽管要平衡所有的残差可能需要多个子步，但 ANSYS 可以创建重启文件，并仅把最后的收敛映射子步结果写入结果文件（仅有最后的子步参加平衡求解）。ANSYS 忽略前面的任何输出说明（通过 OUTRES 或 RESCONTROL 命令设置）。

成功地将旧网格上的求解参数映射到新网格后，ANSYS 会自动退出求解器。可以检查映射结果和在新网格上通过最后映射子步（开始重分网格的子步加上映射操作所用的子步）生成的标准多重启动文件继续求解。



1.8.3 映射结果的含义

映射（MAPSOLVE）的结果不单单是通过旧网格插值得到的结果变量，而是从旧网格映射的平衡结果。如果新网格的拓扑结构或密度与旧网格的差别非常大，映射结果也可能存在差别。

记录的应力和应变代表时间为 0 时的总应力和应变，记录的位移来自重分操作时间或子步（这时单元坐标通过 REZONE 命令更新）。

执行 MAPSOLVE 命令后，新网格将会有点畸变，并且如果残余力很大的话，畸变可能会更明显。在这种情况下，选择重分网格的区域越仔细，重分网格的质量就越好。

1.8.4 处理收敛困难

在重分网格的过程中，若在映射阶段遇到收敛困难，可试试下面的方法。

- 通过 MPSOLVE 命令指定最大的映射子步数（不能大于 500）。
- 减小新旧网格密度和拓扑结构的差异，尤其是在边界的单元。
- 从较前的子步开始重分网格（这样你可以在一个网格畸变较小的网格上重分网格）。
- 提高新网格的质量。

1.9 执行多重启动

重分网格后，执行标准多重启动可以在新网格的基础上继续求解。即使在同一区域多次重分网格之后，仍然能执行标准多重启动。

如果各个子步的.rxxx 文件、.rdb 文件和.ldhi 文件都存在，可以从任何子步重启求解。仅需要指定重启分析的子步，ANSYS 将监视.rdb 文件和.rst 文件的变化，然后可以在.ldhi 文件中找出相关的载荷历史信息。

重启分析后，ANSYS 将会删除指定重启子步后的子步的所有.rdb 文件、.rst 文件和.rxxx 文件。

注意：这个步骤包括了重分网格过程，在该步骤中可以执行多次重分网格或执行重分网格计算的后处理。

1.10 重复执行重分网格操作

在一个区域尽管先前已重分网格，如果网格畸变仍然存在，则必须再次重分网格。在不

同的时间和子步中，可以对已经重分网格的区域再次执行重分网格操作。

为了再次重分网格，可以选择同一区域或不同的区域。当开始重分网格时，可以使用 Horizontal rezoning 方法为重分网格选择多个区域。尽管在同一个区域没有重分网格次数的限制，ANSYS 一次最多允许重分 99 次。事实上，一般 2～3 次重分网格就足够了。

执行另一个重分网格过程，只需简单地重复执行 Rezoning process 过程，不需要特殊的 ANSYS 命令，且重分网格的过程也不变。

在同一分析中，当在同一区域执行多次网格重分（Multiple rezonings）操作，每次都生成不同的有限元模型。为了能在任何子步重启和重分网格，ANSYS 保存有限元模型和每次重分网格后的模型的.rdb 文件。同样地，也为后处理保存每个模型的.rst 文件。

1.11 后处理重分网格的结果

对于重分网格分析，POST1 后处理器是主要的后处理工具，其大部分的功能都可以用。也可以通过 ANDATA 宏生成动画。时间历程后处理器 POST26 的输出受到结果文件数据的限制。

每次重分网格后，网格都会变化，因此，新的.rdb 文件和.rst 文件是必需的。例如，如果在同一个分析中，二次重分网格，ANSYS 会生成下列结果文件：.rst、.rs01 和.rs02 和下列数据文件：.rdb、.rd01 和.rd02。绝大多数后处理操作过程都是自动地从一个文件到另一个文件。因此，既不能删除任何.rst 或.rdb 文件，也不能删除任何.rsnn 或.rdnn 文件，直到已经完成后处理。

由于 ANSYS 只记录最后一次重分网格模型的位移数据，因此位移数据在不同重分网格的过程中是不连续的。

1.11.1 数据库后处理

在访问 POST1 数据库后处理器之前，先考虑 ANSYS 怎样处理后处理数据文件，方法如下。

- ANSYS 自动地将所有的数据文件作为一个单独的文件处理（假设所必需的文件都存在）。如果在求解完之后退出 ANSYS 程序，而现在又想后处理重分网格的结果，在进入后处理器之前，执行 FILNAME 命令，并指定适当的 jobname，这是后处理重分网格结果的最佳方法。
- 一些文件非常大或丢失，因此只需要检查一个后处理文件，重新读入恰当的数据文件（RESUME）获得正确的显示，然后在 POST1 中执行 FILE 命令（例如，查看后处理数据文件.rs02、重新读入数据文件.rs02。）。

1．列表结果文件概述

在进入 POST1 后处理器之后，执行 SET,LIST 命令是非常有用的。对于重分网格后的结果，STE,LIST 命令生成的列表包括一个附加列（代表保存每个子步的后处理文件）。第一次使用新文件将会被标上“rezone”强调文件改变。下面是 SET,LIST 命令输出的文件。

```
*****  INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE  *****
    SET   TIME/FREQ   LOAD STEP   SUBSTEP  CUMULATIVE   FILE SUFFIX
     1 0.1000000          1          1          2            rst
```

```
  2 0.2000000         1         2         4          rst
  3 0.3500000         1         3         6          rst
  4 0.5500000         1         4         8          rst
  5 0.7500000         1         5        10          rst
  6 0.7500010         1         6        13          rs01   rezone
  7 0.8750000         1         7        15          rs01
  8  1.000000         1         8        17          rs01
  ...
```



通过 SET,LIST 命令输出的文件也可用于简单地判断哪些信息有用。对于非重分网格分析，例如，可以为进一步的施加载荷步选择子步和子步编号、时间或设置编号。

尽管 ANSYS 为重分网格分析创建了多个后处理数据文件，因为不需要直接评估单个文件，所以可以将它们作为一个文件来后处理（假设恰当的 jobname 已经指定）。ANSYS 程序自动地查找通过 SET 命令指定的文件，读入文件后，绝大多数的通用后处理命令都可以使用。

2．动画

可通过 ANDATA 宏生成重分网格分析的动画。假如恰当的 jobname 已经指定，程序会自动地从一个文件到另一个文件执行，使用文件中的数据生成动画。在宏开始扫描时，ANSYS 保存每个子步的观察位置和大小。程序根据这些信息选择一个固定的观察点（通过/FOCUS 和/DIST 命令确定该值）。

3．结果观察器

结果观察器不支持自动地观察所有的结果文件。当打开一个文件时，只能观察该文件中的结果数据。如果要观察另一个文件中的结果，必须人工指定并打开该文件。在结果观察器中打开.rsxx 文件（例如.rs01）的步骤是：

1）选择 File→Open Results....。

2）在 Files of type 框中选择 All File Types (*.*)选项。

3）选择.rsxx 结果文件。

1.11.2 时间历程后处理器

当在一个重分网格的模型中作用时间历程后处理器（/POST26），所有通用信息都有用。然而，由于 POST26 只处理后处理数据文件和数据文件，因此只能单独打开每个结果文件。

对每个想打开的文件：

（1）重置（RESET）后处理器设置到默认值，清除所有定义的变量，清除数据库。

（2）重读入（RESUME）恰当的数据文件（例如，检查后处理数据中的结果文件.rs02，重读入数据库文件.rd02）。

（3）执行 FILE 命令打开想要打开的文件。

在任何给定的时间仅所要求输出的文件可供输出，因为保存在一个文件中的单元和节点文件不总存在于另一个文件。

第 2 章　流体压力渗透载荷

基于接触状态，压力渗透载荷（Pressure-penetration loads）可以模拟仿真计算周围的液体或空气渗透到接触面的影响。用户可以把流体压力渗透载荷施加到柔体-柔体或刚体-柔体接触对。二维和三维 CONTA171、CONTA172、CONTA173 和 CONTA174 面-面接触单元都支持压力渗透载荷。

流体压力可以从一个或多个位置渗入到接触面之间。流体压力渗透载荷具有路径依赖的性质。渗透路径可以发展和变化，这取决于迭代计算。在每个迭代开始时，ANSYS 首先检测开始承受流体压力的点，然后 ANSYS 在这些点中根据接触状态是打开或丢失来找出流体的渗透点，此外如果计算中某些点的接触压力小于用户自定义压力渗透准则中的压力，则这些点也被 ANSYS 判定为渗透点。

当 ANSYS 发现存在渗透接触条件的点后，这个点及最靠近这个点的节点都将承受流体压力载荷，如图 2-1 所示。流体压力载荷不能施加到接触状态为张开的面上，除非该面的终点或边缘属于承受渗透压力载荷的起始点。

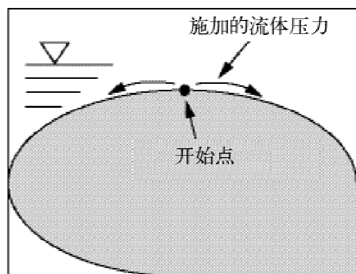


图 2-1　与路径相关的流体压力渗透载荷

流体压力从渗透点开始渗透到接触面和目标面之间的界面。当重新建立界面接触时或接触压力大于流体渗透准则压力时，流体渗透可以被中断。

2.1　施加流体渗透载荷

流体渗透载荷必须使用 SFE 命令施加到接触和目标单元上，格式如下。

```
SFE,ELEM,1,PRES,,VAL1,VAL2,VAL3,VAL4
```

流体压力仅能施加到接触和目标单元上的角节点处。CONTA172、CONTA174、TARGE169 和 TARGE170 单元中间节点上压力通过临近的角节点上的压力平均值得到。VAL3 和 VAL4 不能应用到二维接触和目标单元上。

施加到接触/目标单元节点上的压力值 VALi 可以是常数也可以是表格名。如果是常数，根据 KBC 命令的设置压力幅值可以是阶跃变化，也可以是斜坡变化。为了定义表格载荷，表格名要放在百分号内，例如%tabname%。可以使用*DIM 命令定义一个表格。程序仅支持一个表格并且必须放在 VAL1 位置，放在其他位置将被忽略。

基于接触状态，流体压力渗透载荷将被自动施加到接触和目标面上的渗透点。默认情况下，接触单元的关键字 KEYOPT(14) = 0，基于当前接触状态，流体压力渗透载荷在迭代计算中会随之变化。在这种情况下，接触状态默认设置会引起不稳定的收敛模式。

建议设置 KEYOPT(14) = 1，这样即便在迭代计算中接触状态发生变化，压力渗透载荷也将在开始计算时的子步就施加到接触和目标单元上，并在随后的子步中保持不变。并且要尽量施加较小的增量，才能获得较精确的解。

当定义流体渗透载荷时，需注意以下几点。



- 对于对称接触对的柔-柔接触，仅能将流体压力施加到接触单元上。
- 对于非对称接触对的柔-柔接触，一般情况下应该将流体压力施加到当前或计算过程中周围存在液体的接触和目标单元上。如果没有流体渗透载荷施加到接触对中相关联的接触单元面上，则 ANSYS 将忽略施加到目标面上的流体渗透载荷。当流体压力渗透载荷施加到接触和目标单元上时，ANSYS 必须为接触面和目标面确定渗透路径。确定目标面上的渗透路径的迭代过程非常耗时，特别对于三维接触模型更加耗时。因此，建议使用对称接触对，因为该方法不需要在目标面上指定流体渗透压力。
- 对于刚体-柔体接触，必须将流体压力施加到接触单元上。ANSYS 将自动在刚性目标面上施加等效的力来平衡施加到接触面上的压力，施加到刚性面上的流体压力将被忽略。
- 如果在相同的面上定义了多个接触对，则接触单元可能发生重叠。对于这种情况，要小心将流体渗透压力载荷施加到存在重叠接触单元的面上。
- 仅能使用 SFE 命令将流体渗透压力载荷施加到接触和目标单元上，其他的压力载荷命令都是无效的。此外，不能将压力施加到下伏单元上。
- ANSYS 会忽略定义在多点约束上的任何流体渗透载荷。
- ANSYS 会自动将压力载荷的刚度影响考虑到总体刚度矩阵中。如果计算中存在非对称矩阵并且希望完成对压力载荷刚度的收敛计算，则输入 NROPT,UNSYM 命令。

2.2 指定流体渗透开始点

当已经施加了流体压力渗透载荷，则流体压力会从定义的初始点渗入到接触单元与目标单元之间的界面，可能存在一个或多个开始点（starting points）。

通过选择的二维接触的自由末端点或三维接触自由开放边界上的节点，ANSYS 将自动寻找开始点。自由的含义是该单元未被其周围的单元完全包围，如图 2-2 所示。

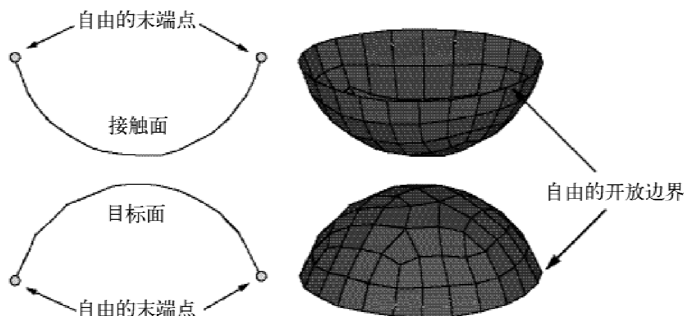


图 2-2　二维接触中自由的末端点和三维接触中的自由开放边界

开始点最先承受流体渗透载荷，如果接触/目标面是连续闭循环的，则没有默认的开始点。可以使用 SFE 命令，配合该命令中的 STAi 值进行指定开始点、渗透点以及移除默认的开始点的设置。

为了指定 STAi 的设置，必须设置 SFE 命令中的 LKEY = 2，该命令格式为

```
SFE,ELEM,2,PRES,,STA1,STA2,STA3,STA4
```

SFE 命令中各值的赋值含义如表 2-1 所示。

表 2-1 STAi 的赋值含义

STAi=0 (默认)	基于接触状态，ANSYS 来确定第 i 个节点是否为开始节点。该节点如果是二维自由点或三维自由边界上的节点，则该节点为默认的开始点
STAi = 1	开始与流体相接触的第 i 个节点为开始节点。如果初始接触状态为张开，则该节点为渗透节点。在变形过程中当接触状态发生变化时，则该节点可能不再是开始点
STAi = 2	第 i 个节点为渗透点。无论接触状态如何变化，该节点总是承受流体压力
STAi = −1	第 i 个节点将不是默认的开始点，即使该节点属于二维自由点或三维自由边界节点

注意：如果用户仅设置了 STA1 并且其他 STAi 值为空，则 STA2, STA3 和 STA4 取值都为 STA1。

2.3　指定压力渗透准则

使用接触单元实常数 PPCN 能够指定一个压力渗透准则。当接触压力小于准则压力值时，开始点就转换为渗透点，也就是说流体压力开始渗透。因此，较大的临界值将允许流体更加容易发生渗透。当接触压力大于准则压力值时，渗透点转换为开始点，也就是说流体渗透被中断。默认情况下，渗透准则的 PPCN 等于 0。在默认设置下只有当接触状态为张开时才会发生流体渗透，而当重新发生接触时流体渗透就会被中断。用户可以把 PPCN 定义为常数或表格数据。表格数据可以被定义为接触点当前位置坐标、接触压力、时间或温度的函数。

2.4　指定流体渗透作用时间

当发生压力渗透时，流体压力被垂直施加到接触/目标面上。与常规的压力载荷相比，施加到子步上的流体压力大小取决于压力是常数输入还是表格输入，同时还取决于是阶跃加载还是斜坡加载。

如果瞬时施加所有的流体压力，则会造成在靠近接触界面附近产出较大的应力梯度，从而造成计算收敛困难。同理，当流体压力突然被移除或突然中断流体渗透，也会导致计算收敛困难。为了稳定计算并提高计算的收敛性，ANSYS 提供了斜坡施加流体压力的选项，该选项在一个求解周期中通过多个计算子步线性地增加流体压力进行加载。

为了实现斜坡加载，可以使用接触单元实常数 FPAT 指定流体渗透作用时间。输入正值表示渗透作用时间等于输入的时间乘以载荷步的增量时间；输入负值表示渗透作用时间就是

该数值的绝对值。ANSYS 的默认值为 0.01，则默认的渗透作用时间等于 0.01 乘以当前载荷步的时间增量。

在每一个渗透点，如果当前子步的增量时间小于流体渗透作用时间，即 FPAT > (t_n − t_{n-1})，则流体压力在渗透作用时间周期中，从前一个子步施加的压力线性变化增加到总的流体压力，如图 2-3 所示。如果 FPAT < (t_n − t_{n-1})，则施加当前全部的流体压力如图 2-4 所示。在压力渗透关闭点，如果当前子步的时间增量小于流体渗透作用时间，则流体压力在渗透作用时间周期中从前一个子步施加的压力值线性减小到 0，否则流体压力将被瞬时删除。

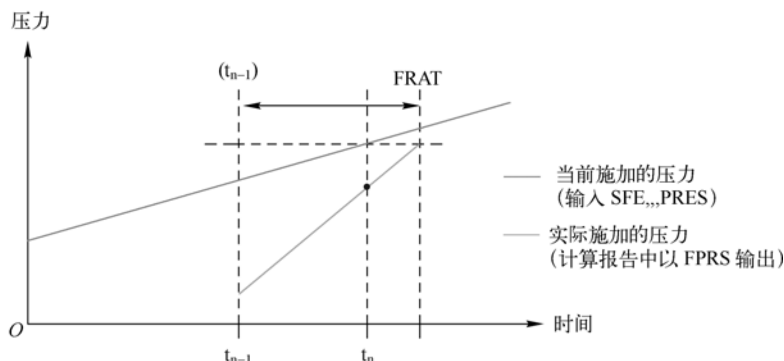


图 2-3 流体渗透作用时间（FPAT）大于子步

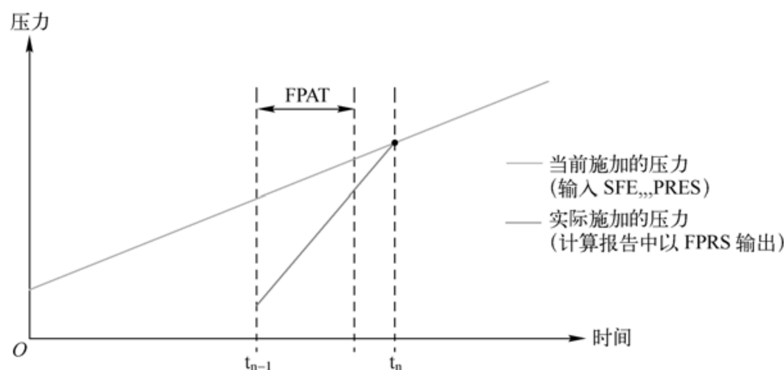


图 2-4 流体渗透作用时间（FPAT）小于子步

2.5 重新定义或修改压力渗透载荷

在载荷步之间，可以使用 SFE 命令重新定义或修改流体压力渗透载荷和流体渗透开始点。也可以使用 RMODIF 命令修改压力渗透准则参数（PPCN）和作用时间（FPAT）。

可以使用以下任何一种方式删除流体压力渗透载荷。

- 使用 SFEDELE 命令删除压力载荷。
- 使用 SFE 命令施加 0 压力。

● 使用 EKILL 杀死接触单元。

因为这些方法都是瞬时删除流体渗透载荷的，可能会造成收敛困难。为了避免收敛困难，建议施加一个很小的流体压力然后使用 SFE 命令来代替删除压力载荷的方法。

2.6 后处理流体压力渗透载荷

可以使用 FPRS 在通用后处理中列表和图形显示的方法查看作用在接触/目标单元上的渗透压力。

```
PLESOL,CONT,FPRS
PLNSOL,CONT,FPRS
```



第 3 章 基于重分网格的密封圈大变形分析

3.1 引言

橡胶密封圈是一种最为常见的密封元件，以其性能优势被广泛地应用于机械设备。然而由于橡胶密封件的密封计算涉及固体力学、摩擦学、高分子材料学以及计算方法学等多方面的理论知识，因此在理论上要对其进行精确研究存在许多困难，其密封机理和密封的失效机理还远未被人们所完全了解。目前，橡胶密封圈的设计基本上是依赖经验数据和定性原则。密封圈在密封槽内的变形以及密封界面上应力的分布是影响密封性能的重要参数。同时，密封圈在密封沟槽内与周围接触界面之间的摩擦因数，通过摩擦力影响密封圈的扭转和挠曲等特性也对其密封性能有着重要影响。密封圈有限元分析中会涉及密封圈的大变形问题，因此计算中密封圈可能出现网格扭曲和畸变，最终将导致有限元计算失败。为此，本实例为用户介绍了解决这一问题的方法——网格重分技术。对于该技术的详细讲解，用户可以参考第 1 章。

3.2 几何模型

图 3-1 给出了密封系统的简图，该密封系统主要由方形密封圈、圆形刚性轴和刚性匹配件 *AB* 三部分组成。

具体的几何尺寸如下：L=0.02m，H=0.06m，L_1=0.08m，D=0.018m，H_1=0.05D。

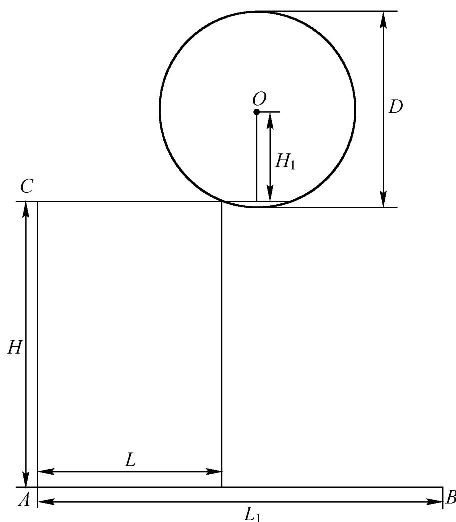


图 3-1　密封系统模型简图

3.3 材料模型

计算中圆形刚性轴和刚性匹配件假设为刚体。方形密封圈的弹性模量为 14.04MPa，泊松比为 0.4999，方形密封圈的超弹本构关系采用两参数 Mooney-Rivlin 模型，其应变能势函数为

$$W = C_{10}(\overline{I}_1 - 3) + C_{01}(\overline{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J-1)^2 \tag{3-1}$$

式中，C_{10} 和 C_{01} 为材料常数；$\overline{I}_1$ 为第一应变偏量不变量；$\overline{I}_2$ 为第二应变偏量不变量；d 为材料不可压缩参数。计算中需要用户输入三个参数，即 C_{10}、C_{01} 和 d。本实例中三个参数的取

值分别为 C_{10}=55.2MPa、C_{01}=−32.5MPa 和 d=0.0001mm。

3.4 单元的选择

本实例采用 PLANE182 单元模拟方形密封圈，并设置单元行为为平面应变且采用力/位移混合算法。方形密封圈与刚性匹配件之间的接触对及方形密封圈与刚性轴之间的接触对均使用接触向导自动生成，两个接触对之间的摩擦因数为 0。

3.5 边界条件和载荷

约束方形密封圈 *AC* 边界的横向移动，并固定约束刚性匹配件 *AB*；约束圆形刚性匹配件的横向和转动自由度，并施加向下位移为 14mm。

3.6 GUI 操作

3.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“SEALING RING LARGE DEFORMATION”，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 4 node 182 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 PLANE182。单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置单元行为（Element behavior）为平面应变（Plane strain）；设置单元公式（Element formulation）为位移/力（Mixed U/P）单击“OK”按钮返回单元类型界面，然后单击 Close 按钮关闭对话框。

3．定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出定义材料模型面板（Define Material Model Behavior），单击 Structural→Liner→Elastic→Isotropic，又弹出一个输入材料属性的对话框，输入 EX=14.04、PRXY=0.4999，单击“OK”按钮；单击 Structural→Nonlinear→Elastic→Hyperelastic→Mooney-Rivlin→2 parameters，弹出的两参数 Mooney-Rivlin 模型，如图 3-2 所示，在面板中输入 C10=55.2、C01=−32.5 和 d=1E−4，输入完毕后单击“OK”按钮，单击 Material→Exit，退出定义材料模型面板。

4．建立模型

（1）定义参数

在命令输入窗口中输入：L=12、H=25、L1=60、D=30、H1=0.433*D、Y0=H+H1、

X0=L+SQRT((D/2)**2-H1**2)。

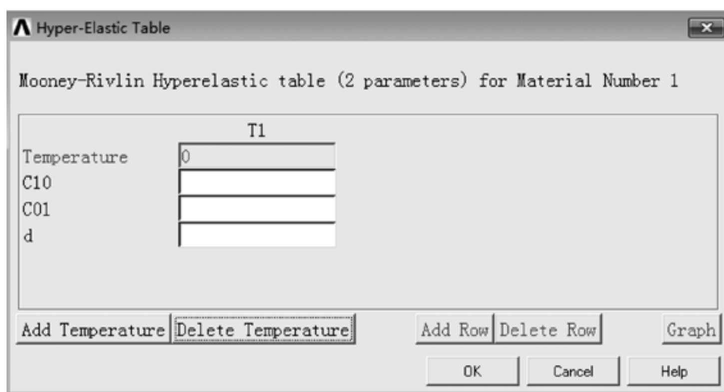


图 3-2 两参数 Mooney-Rivlin 模型参数输入面板

（2）建立方形密封圈

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出创建矩形面板，如图 3-3 所示，在该面板中输入 X1=0、X2=L、Y1=0 和 Y2=H，单击“OK”按钮。

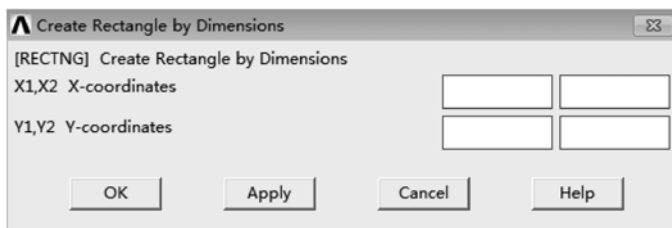


图 3-3 创建矩形面板

（3）建立圆形刚性匹配件

1）建立圆形面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Solid Circle，在弹出的对话框中输入圆形刚性匹配件的圆心坐标：WPX=X0、WPY=Y0 和半径 Radius=D/2，单击“OK”按钮。

2）仅删除圆形面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Areas Only，弹出拾取对话框，拾取圆形面，单击“OK”按钮。

（4）建立刚性匹配件 *AB*

1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出定义关键点面板，如图 3-4 所示，在该面板中输入关键点号（Keypoint number）9，然后继续输入在激活坐标系对应的坐标：X=0、Y=0 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 10 和对应的坐标：X=L1、Y=0 和 Z=0，单击“OK”按钮。

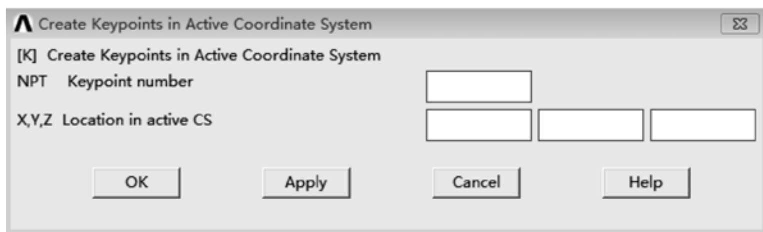


图 3-4 定义关键点面板

2）定义线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 9 和 10，单击“OK”按钮。

5．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置网格属性

选择网格划分工具面板上的单元属性（Element Attributes）子面板的中总体设置（Global)，并单击“Set”按钮，弹出网格属性设置面板，如图 3-5 所示，该面板中主要包括五个选项：设置单元类型号（Element type number），为网格划分准备单元；设置材料号（Material number)，为生成的单元赋予相应的材料模型号；设置实常数号（Real constant set number)，为生成的单元赋予相应的实常数号；设置单元坐标系（Element coordinate sys)，为生成的单元赋予相应的坐标系和截面号（Section number)，该选项主要为管道、梁和壳体单元赋予相应的截面信息。这些信息如果已经定义，则在网格属性面板中会有相应的显示，如果没有定义则显示 None defined。

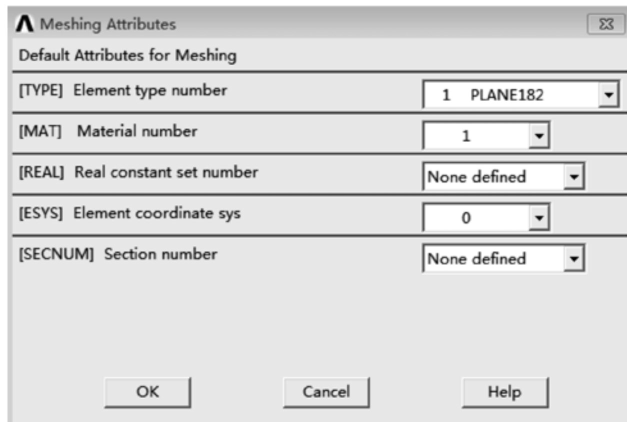


图 3-5 网格属性设置面板

对于本实例因为只存在一种单元和一种材料模型，因此保持默认设置即可。

（3）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项，并单击设置（Set）按钮，如图 3-6 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 3-7 所示。

该设置面板中存在两个控制选项，单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 L/9，单击“OK”按钮。



图 3-6 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

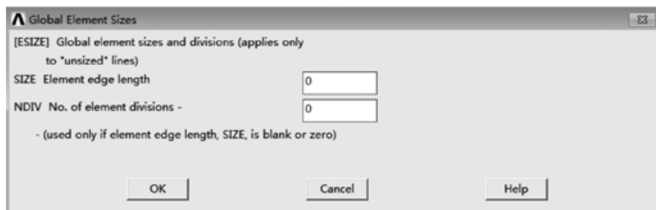


图 3-7 总体网格尺寸设置面板

（4）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取方形密封圈，单击“OK”按钮。

6．定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出接触管理器面板，如图 3-8 所示。

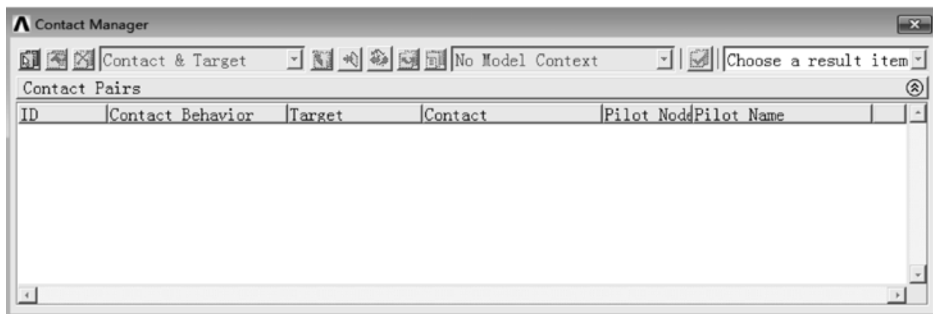


图 3-8 接触管理器面板

（2）创建圆形刚性轴与方形密封圈的刚-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出的目标面及目标单元类型设置面板，如图 3-9 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取圆形刚性轴的四条边，单击“Apply”按钮，然后单击图 3-9 所示的“Next”按钮，弹出图 3-10 所示的设置刚体控制节点的位置面板，在面板中选择控制节点在几何体的中心（At center of mass of target geometric entities），单击“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 3-11 所示。在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L3 和 L2，单击“Apply”按钮，单击图 3-11 中的“Next”按钮，弹出图 3-12 所示的创建接触对面板，在摩擦因数（Coefficient of

Friction）中输入 0，单击“Create”按钮来创建接触对。

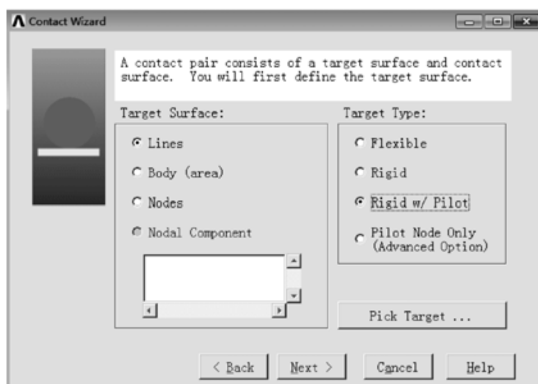


图 3-9　目标面及目标单元类型设置面板

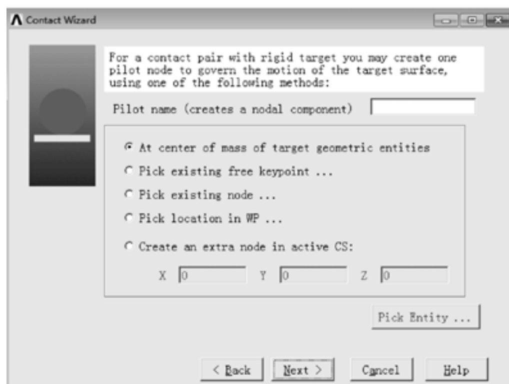


图 3-10　设置刚体控制节点的位置面板

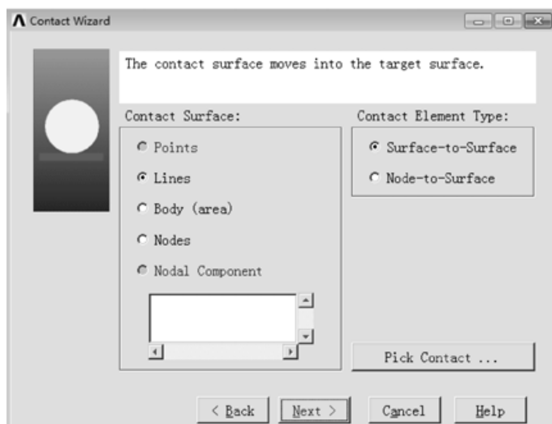


图 3-11　接触面及接触单元类型设置面板

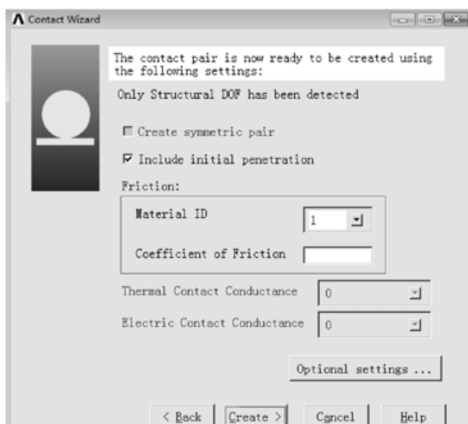


图 3-12　创建接触对面板

（3）创建刚性匹配件 *AB* 与方形密封圈的刚-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 3-9 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *AB*，单击“Apply”按钮，然后单击图 3-9 所示的“Next”按钮，弹出设置刚体控制节点的位置面，如图 3-10 所示，在面板中拾取存在的自由关键点（Pick existing free keypoint），单击“Pick Entity”按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 10，单击“Apply”按钮，单击“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 3-11 所示，在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to- Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L1 和 L2，单击“Apply”按钮，单击图 3-11 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 3-12 所示，在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0，单击 Create 来创建接触对，根据接触对法向设置准则，需要将目标面的法向倒转，单击 Flip Target Normals，拾取刚性匹配件 *AB*，单击“OK”按钮。

3.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 3-13 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

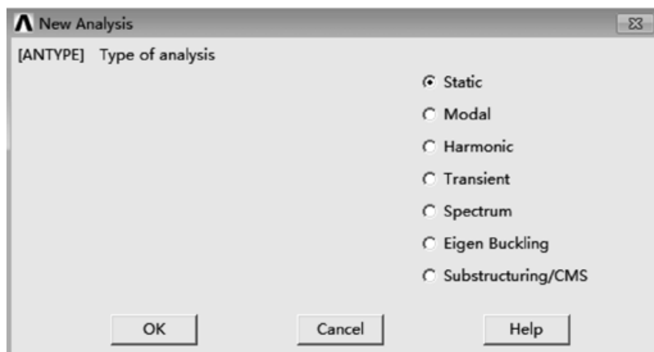


图 3-13　分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 3-14 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

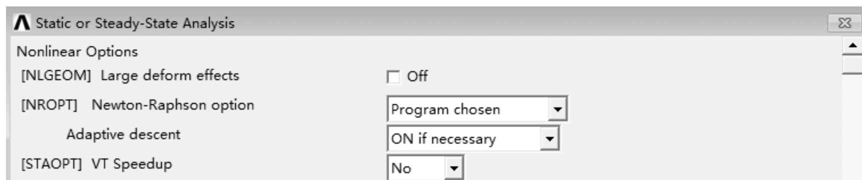


图 3-14　静态分析选项设置面板

2．定义边界条件

（1）约束 AC 边的横向移动

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击“OK”按钮，弹出线位移约束设置面板，如图 3-15 所示，该面板中包括三个控制选择：约束的自由度类型（DOFs to be constrained），本实例中选择 UX，即约束 x 方向的位移；施加方式（Apply as），ANSYS 支持三类施加方式，分别为：施加恒定值（Constant value）、施加已存在的表格值（Existing table）、施加新表格值（New table）。本实例中选择施加恒定值，位移值（Displacement value）中输入 0，单击“OK”按钮。

（2）固定约束刚性匹配件 *AB*

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件的控制节点 204，单击“OK”按钮，在弹出的对

话框中选择约束自由度类型（DOFs to be constrained）中的 ALL DOF，单击“OK”按钮。

（3）约束圆形刚性匹配件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件的控制节点 202，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中的选择约束自由度类型中选择 UX 和 ROTZ，单击“OK”按钮。

3．定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件的控制节点 202，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中的选择约束自由度类型中选择 UY，并在位移值中输入-15，然后单击“OK”按钮。

4．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出计算结果输出控制面板，如图 3-16 所示，该面板包括两个控制选项：设置计算输出选项（Item to be controlled），如果硬盘空间足够大，建议设置输出所有选项（All items）；文件写入频率（File write frequency），包括重置（Reset），不写入任何数据（None），在时间点处写入（At time points），写入最后子步（Last substep），把每一个子步的计算结果都写入到计算结果文件（Every substep），每隔 *N* 个子步写入一次计算结果（Every substep），选择该选项后需输入 *N* 值，本实例选择 Every substep，单击“OK”按钮。

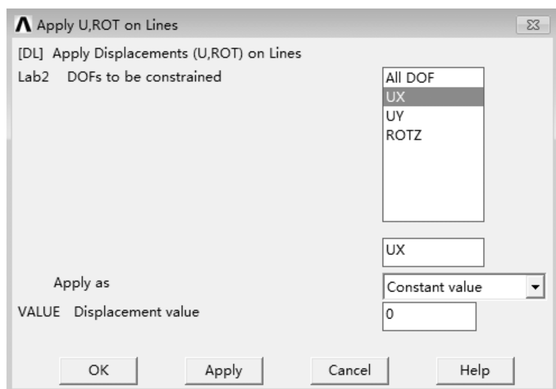


图 3-15 线位移约束设置面板

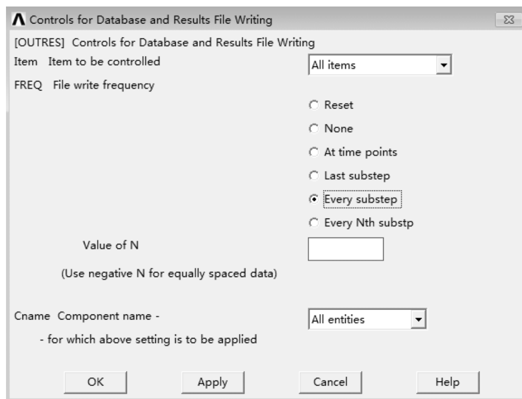


图 3-16 计算结果输出控制面板

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 3-17 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 10，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数为 100（Maximum no. of substeps）和最小子步数为 10（Minimum no. of substeps）。

（3）设置重启动选项

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Restart Control，弹出重启动设置面板，如图 3-18 所示，设置重启动动作（Action）为定义 （Define），重启载荷步

（Load Step）为全部子步（All），文件写入频率（File write frequency）为全部写入（All），单击“OK”按钮。

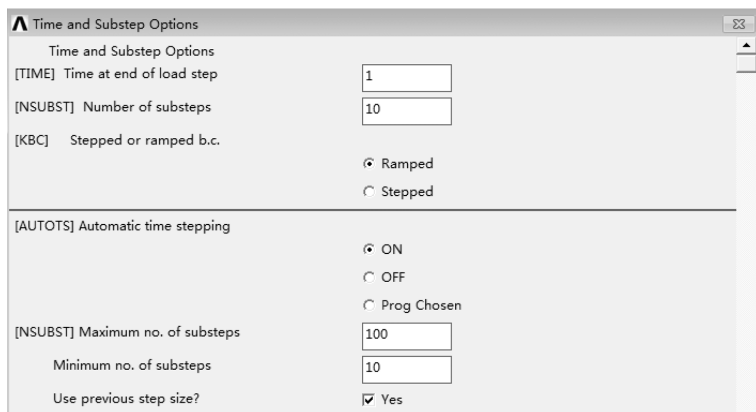


图 3-17 时间和子步选项设置面板

5．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。求解由于网格发生扭曲而会终止，接下来将采用重分网格技术解决这一问题。

6．重分网格

（1）确定开始重分网格的子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Start，弹出选择重分子步设置面板，如图 3-19 所示，选择第 7 个子步开始重分网格，单击“View Deformed Geometry”按钮可以查看当前子步的网格变形情况，最后单击“OK”按钮。

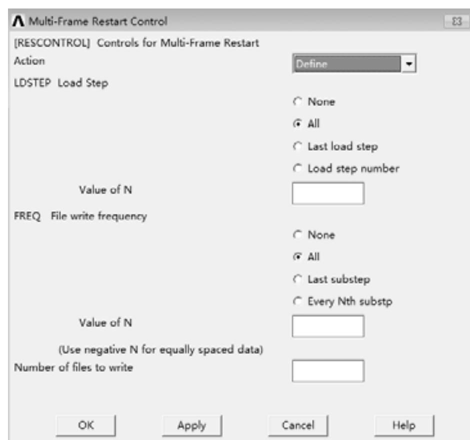


图 3-18 重启动设置面板

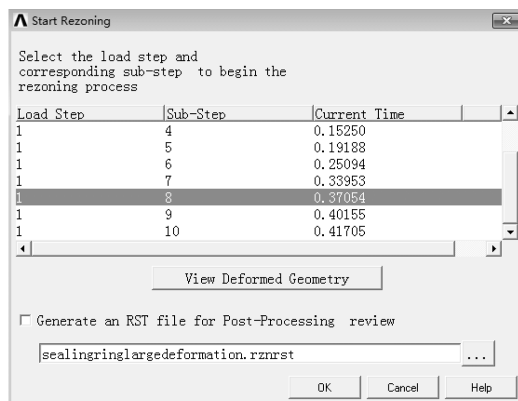


图 3-19 选择重分子步设置面板

（2）创建重分网格单元

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Create Remesh Zone(s) →Select

Rezone Elements，弹出选择重分单元信息对话框，如图 3-20 所示，面板中告诉用户使用选择工具来选择需要进行重分的单元，单击“OK”按钮，弹出选择实体面板，如图 3-21 所示，并按照图 3-21 进行设置，单击“OK”按钮。用户鼠标选择单元区域，如图 3-22 所示，单击“OK”按钮。

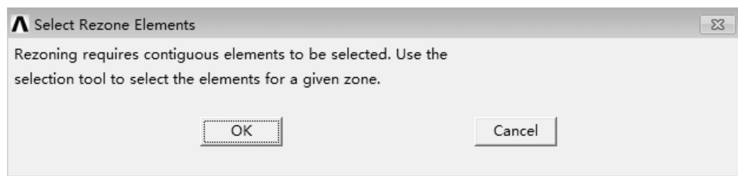


图 3-20　选择重分单元信息对话框



图 3-21　选择实体面板

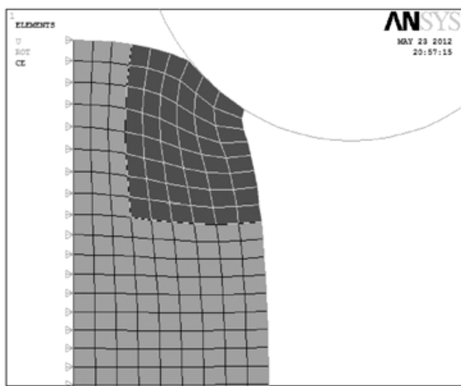


图 3-22　选择重分网格的单元

（3）创建重分网格面

该步骤通过已经选择的单元，来创建需要进行重分网格的面区域，操作路径 GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Create Remesh Zone(s) →Create Rezone Area，弹出创建面区域设置面板，如图 3-23 所示，保持默认设置，单击“OK”按钮。

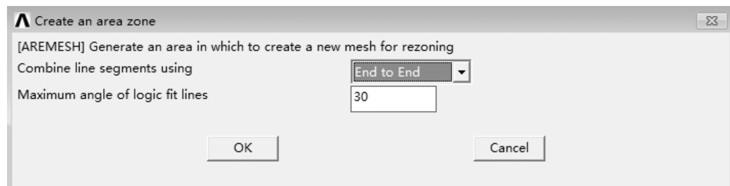


图 3-23　创建面区域设置面板

图 3-24 给出了创建完毕后的重分网格的面区域。

（4）重新划分新面的单元

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Mesh Controls→MeshTool，打开网格划分工具面板，单击该面板上尺寸控制区域（Size Controls）中线（Lines）尺寸设置（Set）按钮，弹出选择对话框，用鼠标选择线 L30 和 L17，单击“OK”按钮，弹出线单元尺

寸设置面板，如图 3-25 所示，在面板中的单元边界尺寸（Element edge length）中输入 L/9，单击“OK”按钮。

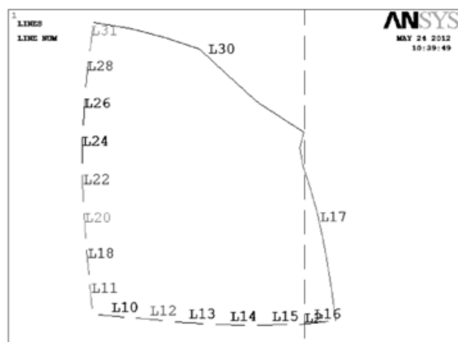


图 3-24 重分网格的面区域

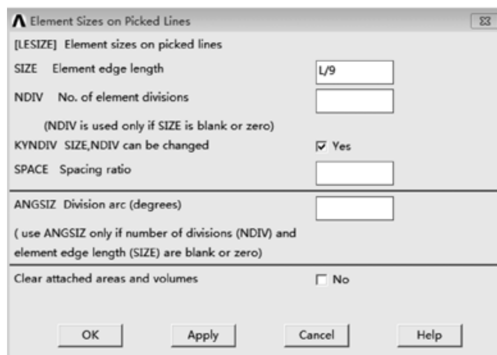


图 3-25 线单元尺寸设置面板

单击网格划分工具面板上的 Mesh 按钮，弹出选择对话框，选择需要重新划分网格的面，单击“OK”按钮。

（5）完成重分网格

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Finish，弹出完成重分网格的消息面板，如图 3-26 所示，单击“OK”按钮。

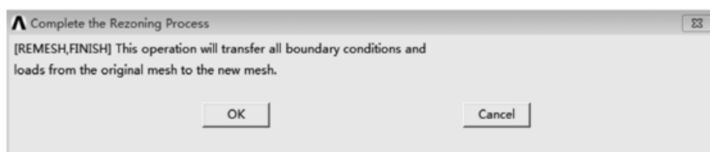


图 3-26 完成重分网格的消息面板

（6）将旧网格结果映射到新网格

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Map Results，弹出映射结果设置面板，如图 3-27 所示，在面板中输入最大迭代子步数为 50，单击“OK”按钮。

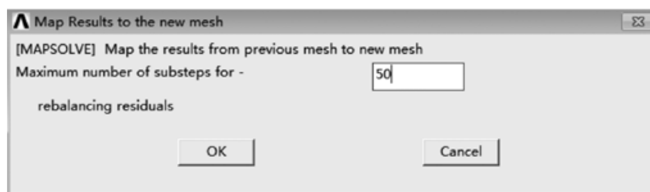


图 3-27 映射结果设置面板

7．再次求解

（1）完成求解

GUI：单击 Main Menu→Finish。

（2）重新进入求解设置重启动

GUI：单击 Main Menu→Analysis Type→Restart，弹出重启动设置面板，如图 3-28 所示，

保持面板默认设置，单击“OK”按钮。

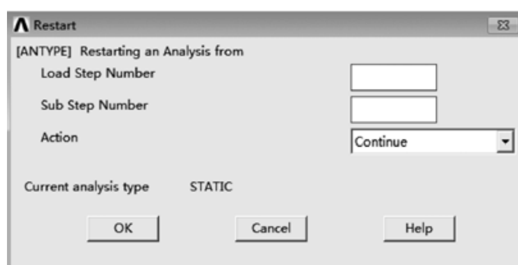


图 3-28　重启动设置面板

（3）开始求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS。

3.6.3 后处理

图 3-29 给出了网格重分前一子步的等效应力云图，由图 3-29 可知最大等效应力为 156.373MPa，图 3-30 给出了重分网格后的等效应力云图，由图 3-30 可知最大等效应力为 193.105MPa，图 3-31 给出了求解完毕后的等效应力云图，由图 3-31 可知，最大等效应力为 507.846MPa，图 3-32 给出了求解完毕后的接触压力云图，由图 3-32 可知，最大接触压力为 513.806MPa。

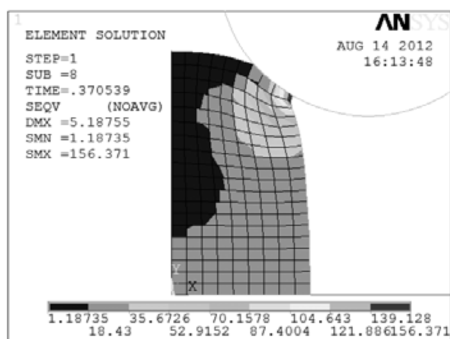


图 3-29　重分网格前一子步的等效应力云图

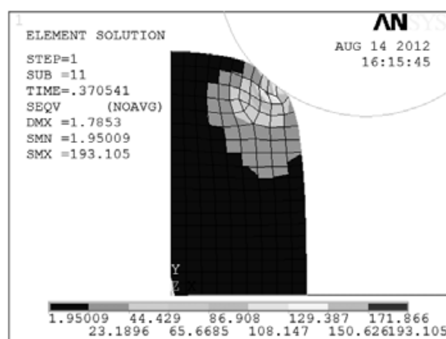


图 3-30　重分网格后的等效应力云图

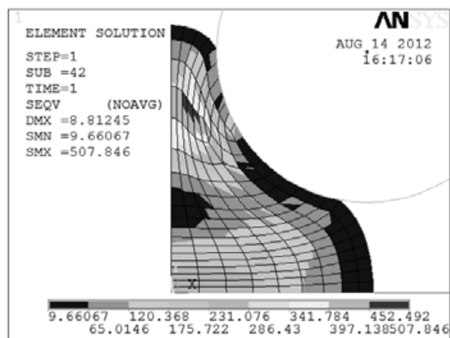


图 3-31　求解完毕后的等效应力云图

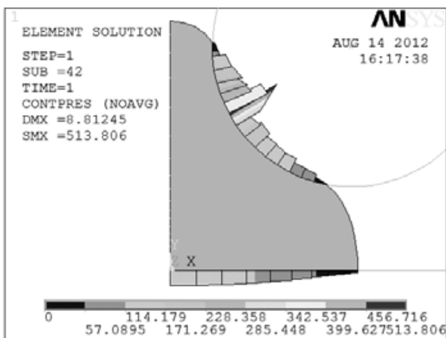


图 3-32　求解完毕后的接触压力云图

3.7 命令流



```
/FILNAME,Sealing ring large deformation,0          !定义文件名
/PREP7
ET,1,PLANE182                                      !定义四节点平面单元
KEYOPT,1,3,2                                       !设置为平面应变单元
KEYOPT,1,6,1                                       !设置单元采用位移/力混合算法
MP,EX,1,14.04                                      !定义超弹密封圈的弹性模量
MP,PRXY,1,0.4999                                   !定义超弹密封圈的泊松比
TB,HYPE,1,1,2,MOON                                 !激活两参数 Mooney-Rivlin 模型
TBDATA,,55.2,-32.5,1E-4                            !输入两参数 Mooney-Rivlin 模型对应的参数
!输入几何尺寸
L=12
H=25
L1=60
D=30
H1=0.433*D
X0=L+SQRT((D/2)**2-H1**2)
Y0=H+H1
!建立模型
RECTNG,0,L,0,H,
CYL4,X0,Y0,D/2
ADELE,2                                            !仅删除面
!定义关键点
K,9,0,0,0
K,10,L1,0,0
L,9,10
ESIZE,L/9                                          !定义总体网格尺寸
AMESH,1                                            !划分面 1 的网格
!通过接触向导定义接触对
!该处命令流详见本章的命令流
/SOL
ANTYPE,0                                           !激活静力学求解
NLGEOM,1                                           !激活大变形
RESCONTRL,DEFINE,ALL,ALL,-1                        !设置重启动
!定义边界条件
LSEL,,,,4                                          !选择线 L4
NSLL,,1                                            !选择依附于 L4 的节点
D,ALL,UX,0.0                                       !约束选择节点的 UX 方向的位移
ALLSEL,ALL                                         !选择所有实体

D,204, , , , , ,ALL, , , , ,                       !约束节点 204 所有方向的自由度
D,202, , , , , ,UX,ROTZ, , , ,
D,202, ,-14, , , ,UY, , , , ,
```

```
OUTRES,ALL,ALL,                        !输出所有子步的结果
TIME,1                                 !设置求解时间
AUTOTS,1                               !激活自动时间步
NSUBST,10,100,10,1
KBC,0
TSRES,ERASE
SOLVE
/SOL
REZONE,MANUAL,1,8                      !指定重分网格的子步为 8
REMESH,START                           !开始网格重分
ESEL,ALL                               !选择所有单元
EPLOT                                  !显示单元
!选择需要进行网格重分的单元
FLST,5,48,2,ORDE,16
FITEM,5,103
FITEM,5,-108
FITEM,5,112
FITEM,5,-117
FITEM,5,121
FITEM,5,-126
FITEM,5,130
FITEM,5,-135
FITEM,5,139
FITEM,5,-144
FITEM,5,148
FITEM,5,-153
FITEM,5,157
FITEM,5,-162
FITEM,5,166
FITEM,5,-171
ESEL,S, , ,P51X
/UI,COLL,0
CMDEL,REZONE_CM
AREMESH,0,30,                          !建立网格重分面
/UI,COLL,1
LESIZE,17,L/9, , , , , , ,1            !设置线 17 的单元尺寸为 L/9
LESIZE,30,L/9, , , , , , ,1            !设置线 30 的单元尺寸为 L/9
AMESH,2
REMESH,FINISH
AREMESHCN
MAPSOLVE,50,                           !开始网格映射求解
FINISH
/SOLUTION
ANTYPE,,RESTART                        !激活重启动
SOLVE                                  !开始求解
FINISH
```



第 4 章　超弹密封垫分析

4.1　引言

密封垫在两个连接件之间建立了一个匹配区域。如果该匹配区域没有分离，就可以传递连接件之间的力和运动。对于典型的密封垫，密封材料必须满足以下条件。

- 确保不规则的面能够匹配良好，并能防止流体泄漏
- 根据外载变化密封压盖自动调节间隙
- 能够抵抗密封件两侧压力差的挤压

密封件常应用于转轴的密封、弹性压缩密封和法兰盘的密封。密封应用可分为两种类型：静态和动态密封。本章主要给用户讲解 2-D 静态弹性密封的非线性分析。

静态弹性密封装置主要由固定匹配面、移动匹配面和密封材料组成。典型的密封材料在两个匹配面之间承受压力而处于压缩状态，以防止流体在匹配面之间发生渗漏，如图 4-1 所示。

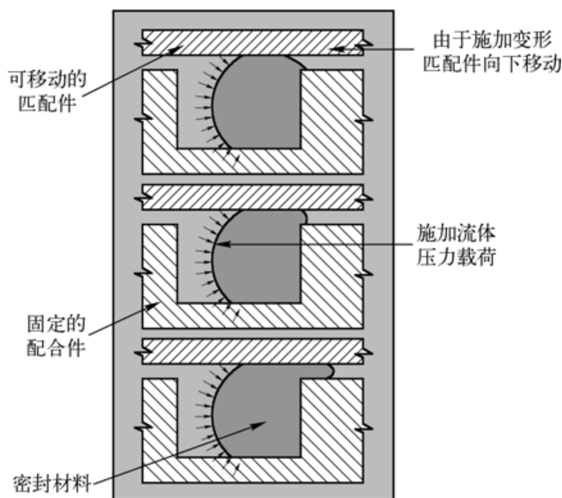


图 4-1　静态弹性密封的装配示意图

4.2　几何模型

图 4-2 给出了超弹密封系统的几何模型，该系统主要由刚性匹配件 *AB*，*CD*，*EF* 和超弹密封垫组成，模型的几何尺寸如下：L_1=4mm，L_2=14mm，L_3=4mm，L_4=3mm，L_5=5mm，H_1=4mm，H_2=2mm，H_3=2mm 和 H_4=4mm。

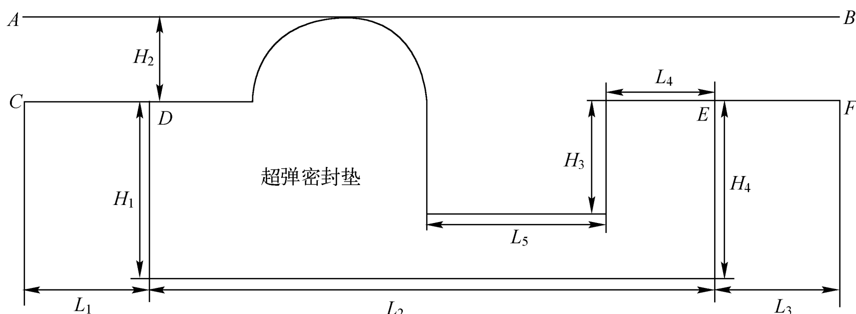


图 4-2　超弹密封系统的几何模型

4.3　材料本构模型

密封系统的超弹密封垫的材料使用两参数 Ogden 超弹模型模拟，Ogden 形式的应变能势函数为

$$W=\sum_{i=1}^{N}\frac{\mu_i}{\alpha_i}\left(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i}+\bar{\lambda}_2^{\alpha_i}+\bar{\lambda}_3^{\alpha_i}-3\right)+\sum_{k=1}^{N}\frac{1}{d_k}\left(J-1\right)^{2k} \tag{4-1}$$

其中，N 为材料常数；μ_i，α_i 和 d_k 为材料常数。

式（4-1）中的 N 值取大些可以提供更好的拟合精度，然而，另一方面会引起数值拟合参数的困难并且还要求提供足够的数据来覆盖整个感兴趣的变形范围。因此建议 N 的取值不大于 3，本实例 N 取 2。该种材料模型选项、体积和偏量项高度耦合。因此，这个模型适合模拟高度可压缩的弹性体。

初始剪切模量

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^{N}\mu_i\alpha_i}{2} \tag{4-2}$$

初始体积模量

$$K=\frac{2}{d_i} \tag{4-3}$$

当 N=1 和α_1=2 时，Ogden potential 等效于 Neo-Hookean potential。当 N=2，α_1=2 和 α_1= −2 时，Ogden potential 可以转化为 2 参数 Mooney-Rivlin 模型。

对于两参数模型式（4-1）中的参数值如下：μ_1=2.8，α_1=7.9，μ_1=−186，α_2=−1.85，d_1=1×10^{-5} 和 d_2=0。超弹密封垫的参考温度为 23℃，热膨胀系数为 8.5×10^{-5}/℃

4.4　单元的选择

本章实例使用 PLANE182 单元模拟超弹密封垫，并使用平面应变的单元行为(KEYOPT(3) = 2)。该单元支持带有 B-Bar 的公式的完全积分算法(KEYOPT(1) = 0)和用来处理体积锁定的混

合 u-p 算法(KEYOPT(1) = 0)。当模型中存在高应变区域，就可能发生体积锁定。

本章实例使用具有加强拉格朗日算法（Augmented Lagrangian formulation，(KEYOPT(2) = 0)的 CONTA171 单元模拟接触面。设置该接触单元的 KEYOPT(10) = 2，即让接触单元刚度在每一次迭代计算后基于下伏实体单元的平均应力进行更新，并使用 TARGE169 单元模拟接触中的目标面。



4.5 边界条件和载荷

本章实例的边界条件如下：固定约束图 4-2 中的 *AB* 和 *AK* 边。超弹密封垫主要承受以下载荷。

（1）向下移动刚性匹配件 1.8mm 使得超弹密封垫顶部的材料受压，在顶部留下 0.2mm 的间隙（TIME = 0 – 1s）。

（2）温度从当前室温升 23° 升到 150°。(TIME = 1 – 2 s)。该载荷步是模拟热载荷阶段，该阶段允许超弹密封垫横向扩展来填补间隙。

本实例使用非线性 Sparse 求解器，当激活几何非线性时，静态分析要求使用该求解器。

4.6 GUI 操作

4.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入"hyperelastic seal analysis"，单击"OK"按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入 L1=4，L2=14，L3=4，L4=3，L5=5，H1=4，H2=2，H3=2 和 H4=4。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 4 node 182 单元，单击"OK"按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 PLANE182。然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置单元行为（Element behavior）为平面应变（Plane strain）；单元计算公式（Element formulation）为位移和力混合计算公式（Mixed U/P），单击"OK"按钮；返回单元类型界面，然后单击 Close 关闭对话框。

4．定义材料模型

（1）定义超弹密封垫的超弹的应力-应变关系

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话

框，单击 Structural>Nonliner>Elastic>Hyperelastic>Ogden>2 terms，弹出输入材料模型的对话框，如图 4-3 所示，输入：mu_1=2.8、a_1=7.9、mu_2=−186、a_2=−1.85、d_1=1E−5、d_2=0，单击“OK”按钮，关闭对话框。

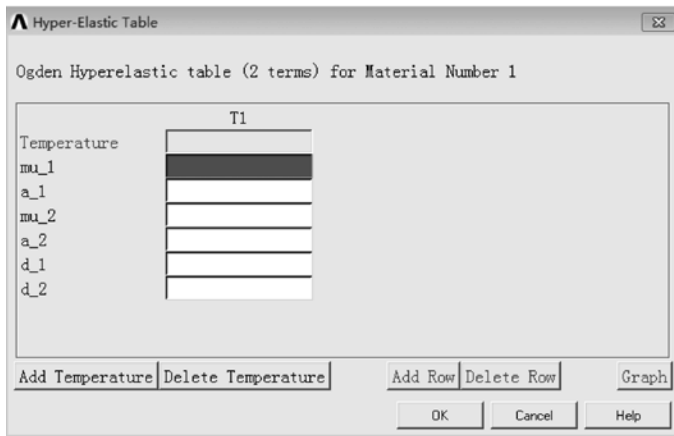


图 4-3　Ogden 两参数的超弹材料模型输入对话框

（2）定义超弹密封垫的热膨胀系数和参考温度

在定义材料模型行为的面板（Define Material Model Behavior）中的可用材料模型（Material Models Available）子面板中选择 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficent→Isotropic，弹出热膨胀系数设置面板，如图 4-4 所示，在面板中输入参考温度（Reference temperature）为 23，热膨胀系数（ALPX）为 8.5e−5，输入完毕，单击“OK”按钮，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

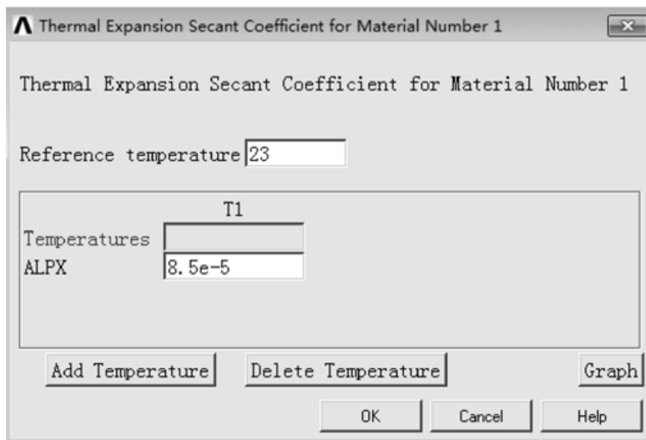


图 4-4　热膨胀系数设置面板

5．建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出图 4-5 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）中

输入 1，在激活的坐标系中输入 X=0，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2，X=L1，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=L1，Y=−H1，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X=L1+L2，Y=−H4，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X= L1+L2+L3，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮，继续输入关键点号为 6，X=L1+L2，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7，X=L1+L2−L4，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点为 8，X=L1+L2−L4，Y=−H3，Z=0，单击“Apply”按钮，继续输入关键点为 9，X=L1+L2−L4−L5，Y=−H3，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 10，X= L1+L2−L4−L5，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 11，X=L1+L2−H2−L5−L4，Y=H2，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 12，X= L1+L2−H2*2−L5−L4，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 13，X=0，Y=H2，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 14，X=L1+L2+L3，Y=H2，Z=0，单击“OK”按钮。



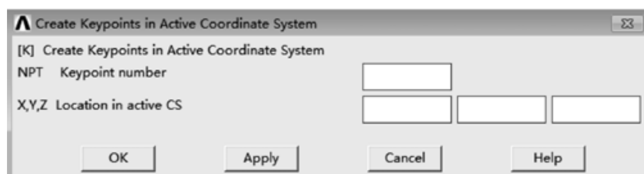


图 4-5 定义关键点面板

（2）定义直线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 2 和 3，单击“Apply”按钮；拾取关键点 3 和 4，单击“Apply”按钮；拾取关键点 4 和 6，单击“Apply”按钮；拾取关键点 6 和 7，单击“Apply”按钮；拾取关键点 7 和 8，单击“Apply”按钮；拾取关键点 8 和 9，单击“Apply”按钮；拾取关键点 9 和 10，单击“Apply”按钮；拾取关键点 12 和 2，单击“Apply”按钮；拾取关键点 1 和 2，单击 Apply 按钮；拾取关键点 6 和 5，单击“Apply”按钮；拾取关键点 13 和 14，单击“OK”按钮。

（3）定义圆弧线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By End KPs & Rad，弹出拾取对话框，用鼠标拾取关键点 12 和 10，单击“Apply”按钮；然后再拾取关键点 11，单击“OK”按钮，弹出通过关键点和半径定义圆弧设置面板，如图 4-6 所示，在面板中输入圆弧半径为 H2，单击“OK”按钮。

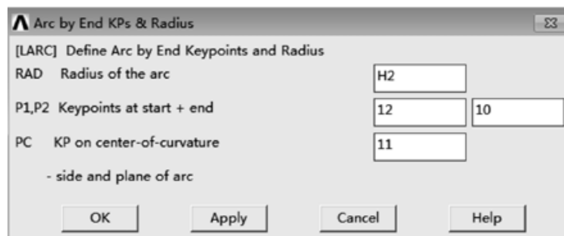


图 4-6 通过关键点和半径定义圆弧设置面板



（4）定义面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1，L2，L3，L4，L5，L6，L7，L12 和 L8，单击“OK”按钮。

6．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项，并单击设置（Set）按钮，如图 4-7 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 4-8 所示。

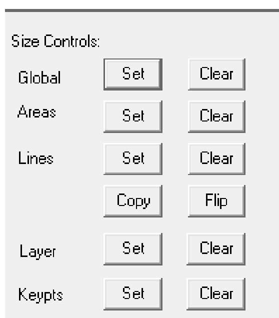


图 4-7　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

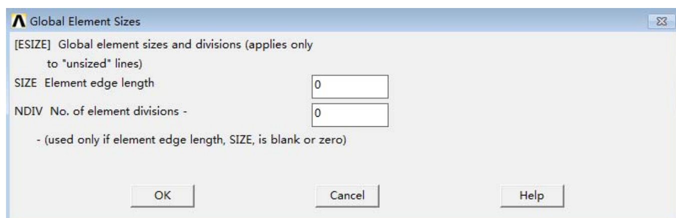


图 4-8　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.13，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取超弹密封垫，单击“OK”按钮。

7．定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出接触管理器面板，如图 4-9 所示。

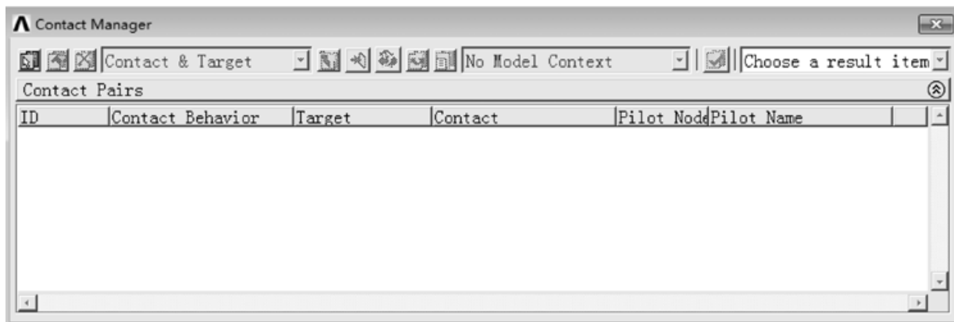


图 4-9　接触管理器面板

（2）创建刚性匹配件 AB 与超弹密封垫的刚-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 4-10 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target…），弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *AB*，单击“Apply”按钮，然后单击图 4-10 所示的“Next”按钮，弹出设置刚体控制节点的位置面板，如图 4-11 所示。在面板中选择拾取存在的自由关键点（Pick existing free keypoint…）做为刚体控制节点，单击“Pick Entity”按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 14，单击“Apply”按钮，单击图 4-11 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 4-12 所示。在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L8，L12 和 L4，单击“Apply”按钮，单击图 4-12 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 4-13 所示，在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0.1，单击“Create”按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看接触对法向没有问题，单击“Finish”按钮。



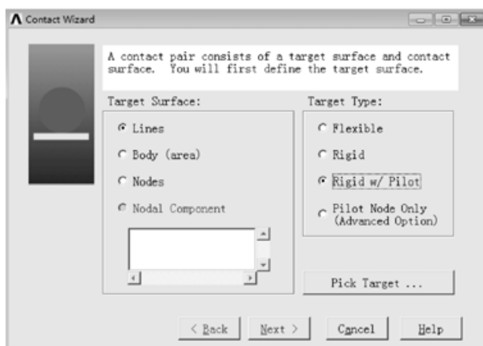


图 4-10　目标面及目标单元类型设置面板

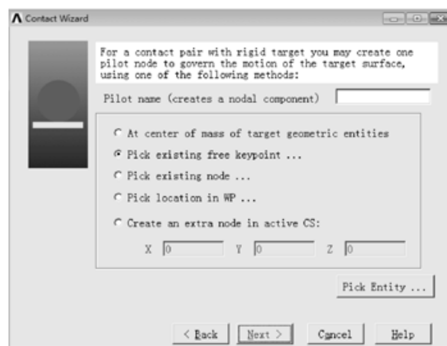


图 4-11　设置刚体控制节点的位置面板

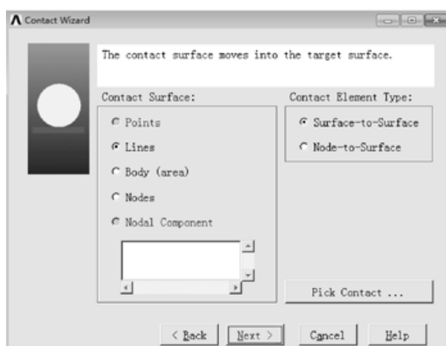


图 4-12　接触面及接触单元类型设置面板

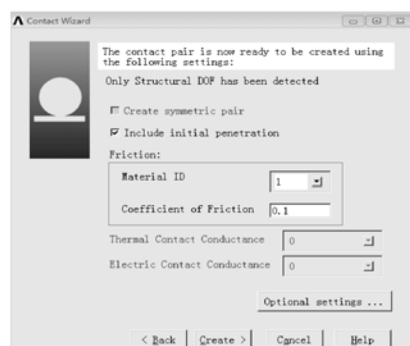


图 4-13　创建接触对面板

（3）创建刚性匹配件 CD 与超弹密封垫的刚-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出如图 4-10 所示的目标面及目标单元类型设置面板，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *CD*，单击“Apply”按钮，然后单击图 4-10 所示的“Next”按钮，弹出图 4-11 所示的设置刚体控制节



点的位置面板。在面板中选择拾取存在的自由关键点（Pick existing free keypoint…）做为刚体控制节点，单击“Pick Entity”按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 1，单击“Apply”按钮，单击图 4-11 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 4-12 所示，在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L8，单击“Apply”按钮，单击图 4-12 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 4-13 所示。在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0.1，单击“Create”按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看需要将目标单元的法向反转，单击“Filp Target Normals”按钮，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *CD*，单击“OK”按钮完成目标单元的法向反转。

（4）创建刚性匹配件 *EF* 与超弹密封垫的刚-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 4-10 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *EF*，单击“Apply”按钮，然后单击图 4-10 所示的“Next”按钮，弹出设置刚体控制节点的位置面板。在面板中选择拾取存在的自由关键点（Pick existing free keypoint…）作为刚体控制节点，单击“Pick Entity”按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 5，单击“Apply”按钮，单击图 4-11 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 4-12 所示，在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L4，单击“Apply”按钮，单击图 4-12 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 4-13 所示。在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0.1，单击“Create”按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看需要将目标单元的法向反转，单击“Filp Target Normals”按钮，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *EF*，单击“OK”按钮完成目标单元的法向反转。

（5）定义超弹密封垫的柔-柔自接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 4-10 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为柔性体（Flexible），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取线 L8，单击“Apply”按钮，然后单击图 4-10 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 4-12 所示。在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L12，单击“Apply”按钮，单击图 4-12 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 4-13 所示，在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0.1，单击“Create”按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看不需要将目标单元的法向反转。

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 4-10 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为柔性体（Flexible），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取线 L5 和 L7，单击“Apply”按钮，然后单击图 4-10 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板。在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L6，单击“Apply”按钮，单击图 4-12 中的“Next”按钮，弹出创

建接触对面板，如图 4-13 所示，在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0.1，单击“Create”按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看不需要将目标单元的法向反转。

4.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 4-14 所示，选择“静力学分析（Static）”，单击“OK”按钮。

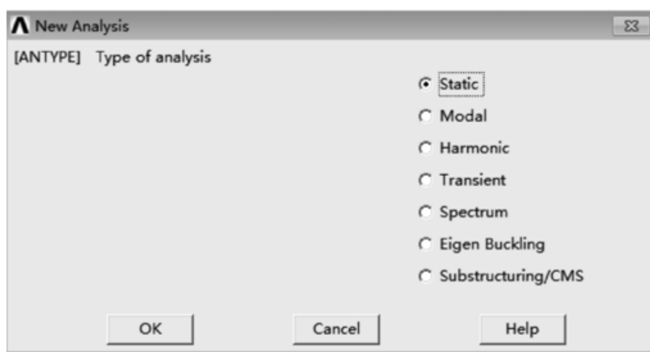


图 4-14 分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 4-15 所示，勾选“大变形（Large deform effects）”复选框，激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

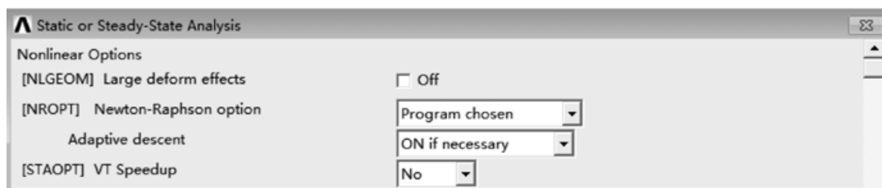


图 4-15 静态分析选项设置面板

2．定义边界条件

（1）定义超弹密封垫的固定约束

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1，L2 和 L3，单击“OK”按钮，弹出线位移约束设置面板，如图 4-16 所示，选择线约束类型为约束所有自由度（All DOF），单击“OK”按钮。

（2）定义超弹密封垫的固定约束

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *CD* 的控制节点 3391，单击“OK”按钮，弹出节点位移约束设置面板选择约束自由度类型（DOFs to be constrained）中的 ALL



DOF，如图 4-17 所示，单击“OK”按钮。

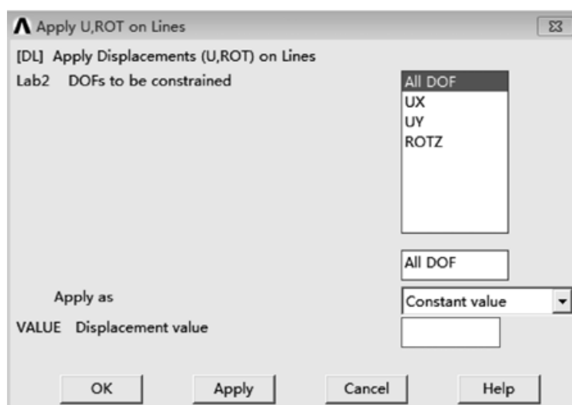


图 4-16 线位移约束设置面板

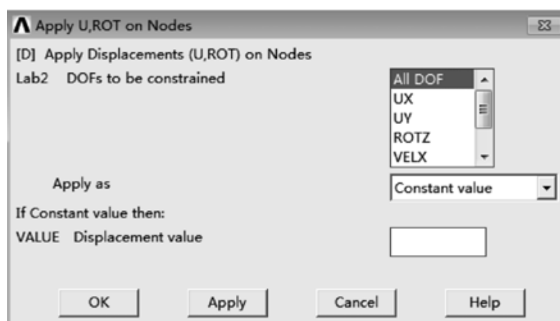


图 4-17 节点位移约束设置面板

（3）定义超弹密封垫的固定约束

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *EF* 的控制节点 3392，单击“OK”按钮，弹出节点位移约束设置面板选择约束自由度类型（DOFs to be constrained）中的 ALL DOF，如图 4-17 所示，单击“OK”按钮。

3．定义位移载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取刚性匹配件 *AB* 的控制节点 3390，单击“OK”按钮，弹出节点位移设置面板选择约束自由度类型（DOFs to be constrained）中的 UY 并输入位移值（Displacement value）为-1.8，如图 4-18 所示，单击“OK”按钮。

4．定义载荷步

（1）输出所有子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出计算结果输出控制面板，如图 4-19 所示，选择文件写入频率（File write frequency）为每一个子步（Every substep），单击“OK”按钮。

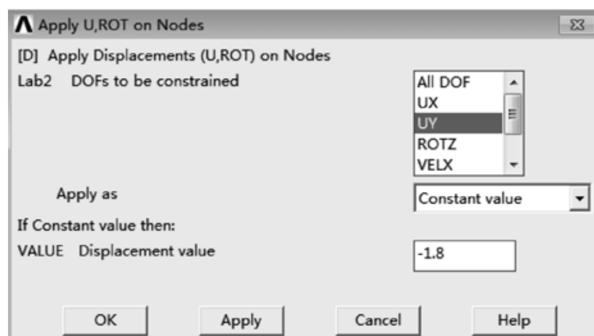


图 4-18 节点位移设置面板

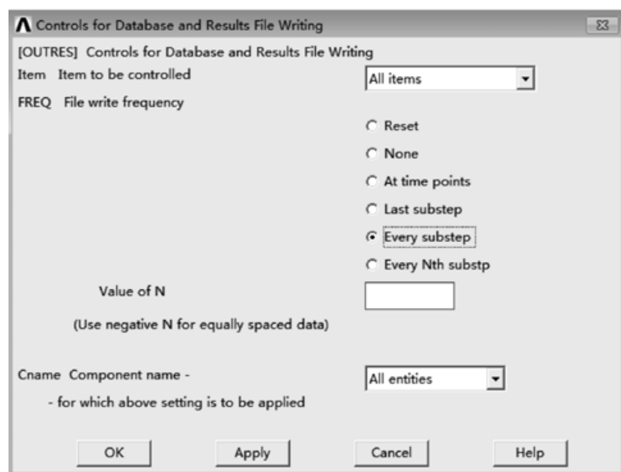


图 4-19 计算结果输出控制面板

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出的时间和子步选项设置面板，如图 4-20 所示，计算时间（Time at end of Load Step）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 80，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 100 和最小子步数（Minimum no. of substeps）为 40。

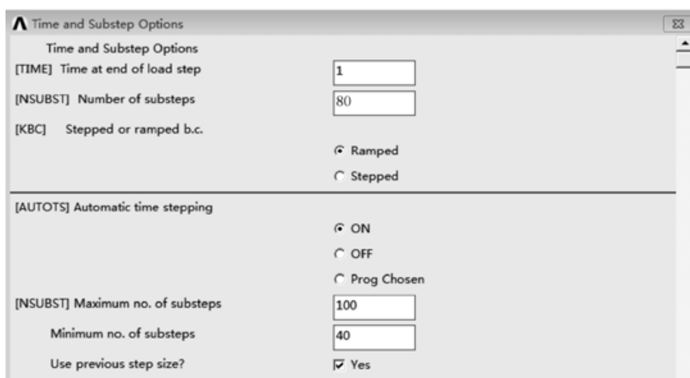


图 4-20 时间和子步选项设置面板

（3）写入载荷步文件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出写入载荷步文件设置面板，如图 4-21 所示，输入载荷步文件序号（Load step file number n）为 1，单击“OK”按钮。

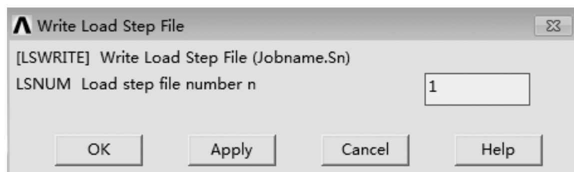


图 4-21　写入载荷步文件设置面板

5．定义温度载荷

（1）定义超弹密封垫初始温度

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp，弹出均匀温度设置面板，如图 4-22 所示，输入均匀温度（Uniform temperature）为 23。

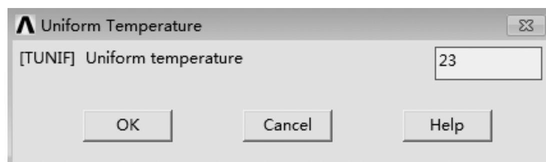


图 4-22　均匀温度设置面板

（2）定义超弹密封垫温度载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Areas，弹出在面上施加温度面板，如图 4-23 所示，输入温度（Temperature）为 253。

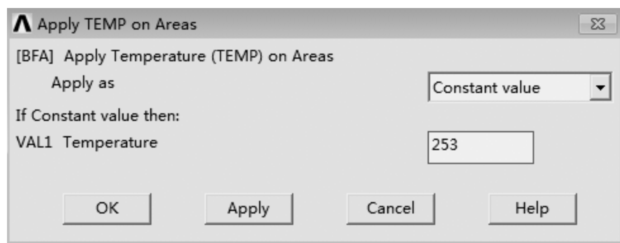


图 4-23　在面上施加温度面板

6．定义载荷步

（1）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 4-24 所示，计算时间（Time at end of Load Step）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 30，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 50 和最小子步数（Minimum no. of substeps）为 20。

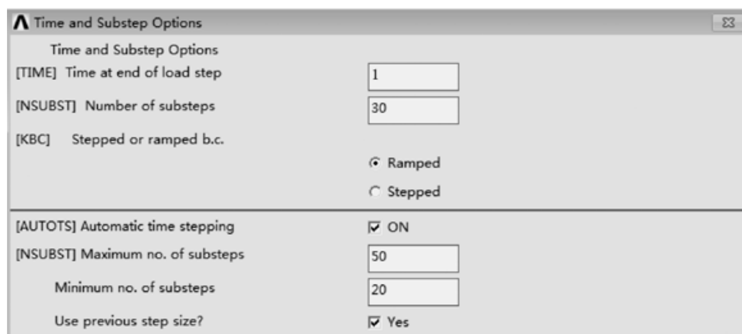


图 4-24　时间和子步选项设置面板

（2）写入载荷步文件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出写入载荷步文件设置面板，如图 4-21 所示，输入载荷步文件序号（Load step file number n）为 2，单击“OK”按钮。

7．定义流体压力渗透载荷

（1）选择接触单元

在命令窗口输入：

esel,s,,,3251,3268　　!选择单元号从 3251 到 3268 的单元

（2）施加流体压力渗透载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Elements，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出在单元上施加压力设置面板，如图 4-25 所示，输入载荷关键号（Load key）为 1；流体渗透压力值（Load PRES value）为 500，单击“OK”按钮。

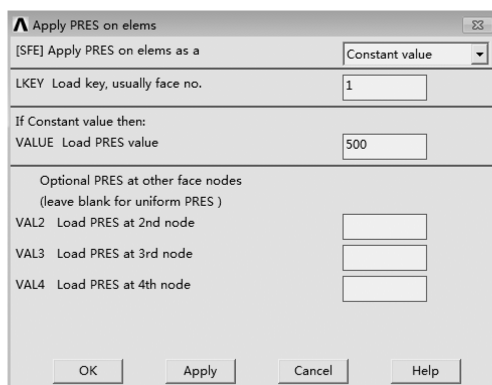


图 4-25　在单元上施加压力设置面板

（3）指定流体渗透压力开始点

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Elements，弹出拾取对话框，如图 4-26 所示，在对话框中输入 3268，单击“OK”按钮，弹出设置流体渗透压力开始点面板，如图 4-27 所示，输入载荷关键字（Load key）为 2，流体

开始点参数（Load PRES value）为 2。



图 4-26　拾取对话框

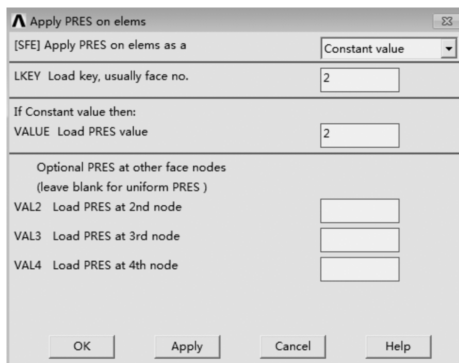


图 4-27　设置流体渗透压力开始点面板

（4）选择所有单元

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

对于施加流体压力渗透载荷的方法、注意事项等更加具体的讲解，详见第 2 章。

8．定义载荷步

（1）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 4-28 所示，计算时间（Time at end of Load Step）输入 3，子步数量（Number of substeps）输入 50，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 100 和最小子步数（Minimum no. of substeps）为 40。

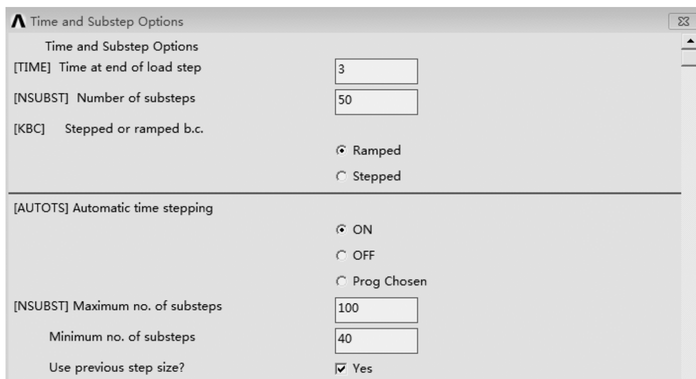


图 4-28　时间和子步选项设置面板

（2）写入载荷步文件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File，弹出写入载荷步文件设置面板，如图 4-21 所示，输入载荷步文件序号（Load step file number n）为 3，单击“OK”按钮。

9．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→From LS Files，弹出载荷步求解设置面板，如

图 4-29 所示，输入开始求解文件号（Starting LS file number）为 1，最终求解文件号（Ending LS file number）为 3，文件号增量（File number increment）为 1，单击“OK”按钮。

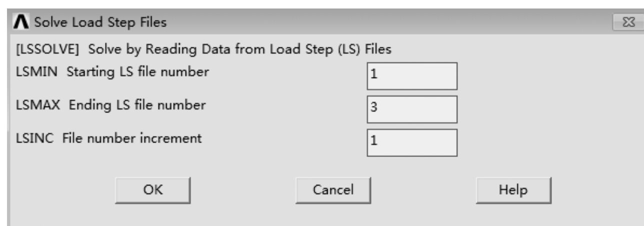


图 4-29 载荷步求解设置面板

4.6.3 后处理

图 4-30～图 4-35 分别给出了不同载荷作用时的等效应力和接触压力云图，由图 4-30～4-35 可知第一个载荷作用时的最大等效应力为 572.581MPa，最大接触压力为 755.312MPa，第二个载荷作用时的最大等效应力为 1163.16MPa，最大接触压力为 1100.95MPa，第三个载荷作用时的最大等效应力为 1225.83MPa，最大接触压力为 1119.95MPa。图 4-36 给出了第三个载荷作用时的位移云图，由图 4-36 可知最大位移为 2.69658mm，图 4-37 给出了第三个载荷作用时的流体渗透压力云图，由图 4-37 可知最大的流体渗透压力作用于流体接触面的中部。

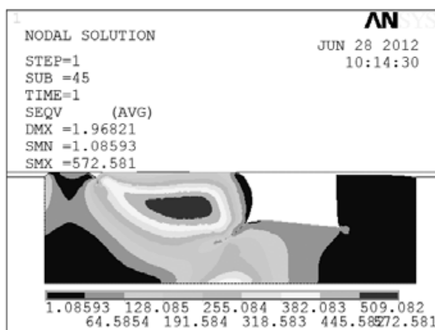


图 4-30 第一个载荷作用时的等效应力云图

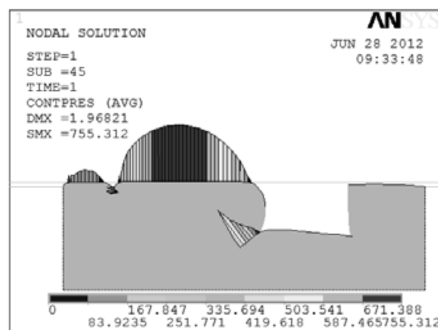


图 4-31 第一个载荷作用时的接触压力云图

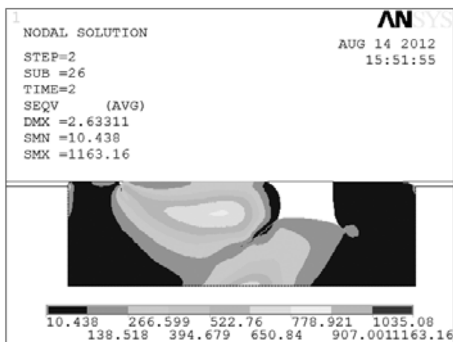


图 4-32 第二个载荷作用时的等效应力云图

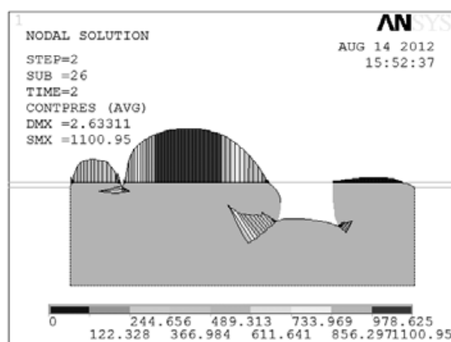


图 4-33 第二个载荷作用时的接触压力云图

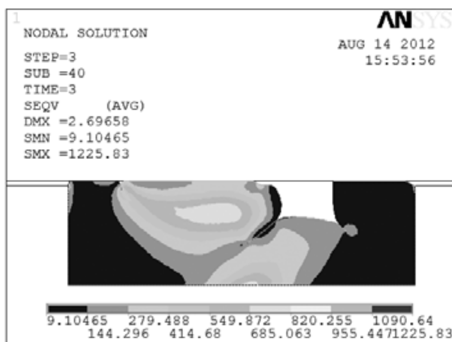


图 4-34　第三个载荷作用时的等效应力云图

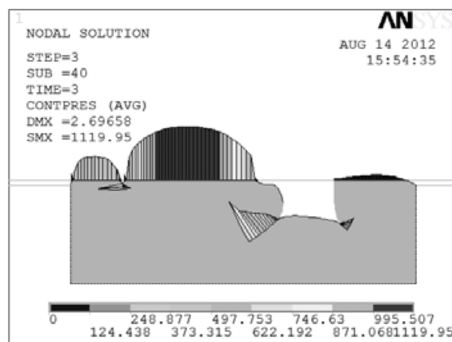


图 4-35　第三个载荷作用时的接触压力云图

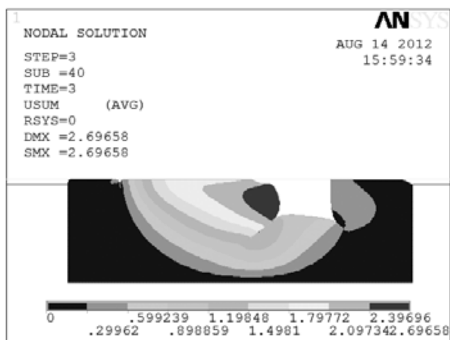


图 4-36　第三个载荷作用时的位移云图

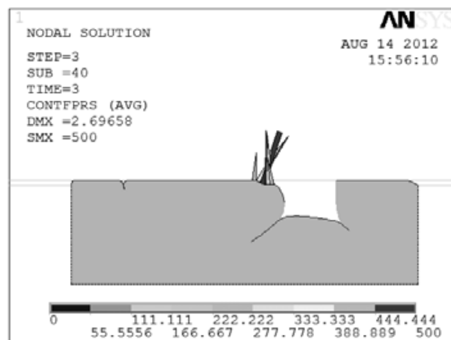


图 4-37　第三个载荷作用时的流体渗透压力云图

4.7　命令流

```
/FILNAME,SEALING SYSTEM,0                !定义文件名
/PREP7 !/进入前处理器
!定义参数
L1=4
L2=14
L3=4
L4=3
L5=5
H1=4
H2=2
H3=2
H4=4

ET,1,PLANE182                            !定义单元
KEYOPT,1,3,2                             !设置为平面应变单元
KEYOPT,1,6,1                             !设置单元采用力/位移算法
!*
TB,HYPE, 1, 1, 2, OGDEN                  !定义超弹密封垫的材料模型为 Ogden 超弹模型
```



```
TBTEMP,0.000000
TBDATA, 1, 2.80000E+00, 7.90000E+00, -1.86000E+02,
TBDATA,4,-1.85000E+00, 1.00000E-05, 0.00000E+00,
!定义超弹密封垫的参考温度和热膨胀系数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,1,REFT,,,23
MPDATA,ALPX,1,,8.5e-5
!定义关键点
K,1,0,0,0
K,2,L1,0,0
K,3,L1,-H1,0
K,4,L1+L2,-H4,0
K,5,L1+L2+L3,0,0
K,6,L1+L2,0,0
K,7,L1+L2-L4,0,0
K,8,L1+L2-L4,-H3,0
K,9,L1+L2-L4-L5,-H3,0
K,10,L1+L2-L4-L5,0,0
K,11,L1+L2-L4-L5-H2,H2,0
K,12,L1+L2-L4-L5-H2*2,0,0
K,13,0,H2,0
K,14,L1+L2+L3,H2,0
!通过关键点定义线
L,2,3
L,3,4
L,4,6
L,6,7
L,7,8
L,8,9
L,9,10
L,12,2
L,1,2
L,6,5
L,13,14
!定义弧线
LARC,10,12,11,H2,
!通过线定义面
AL,1,2,3,4,5,6,7,12,8
!定义总体网格尺寸
ESIZE,0.13
AMESH,1                                          !划分面 1 的网格
!使用接触向导定义接触对
!*    具体命令流参见本章的命令流
/SOL
ANTYPE,0                                         !激活静力学求解
```

```
NLGEOM,1                                 !激活大变形
!定义边界条件
DL,1, ,ALL,                              !约束线 L1 的所有自由度
DL,2, ,ALL,                              !约束线 L2 的所有自由度
DL,3, ,ALL,                              !约束线 L3 的所有自由度
D,3391, , , , , ,ALL, , , , ,            !约束节点 3391 的所有自由度
D,3392, , , , , ,ALL, , , , ,            !约束节点 3392 的所有自由度
D,3390, ,-1.8, , , ,UY, , , , ,          !将控制节点 3390 向下移动 1.8
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL,                          !输出所有子步
TIME,1                                   !定义求解时间为 1
AUTOTS,1                                 !激活自动时间步
NSUBST,40,100,40,1                       !设置求解子步
KBC,0
LSWRITE,1,                               !写入第一个载荷步文件
TUNIF,23,                                !定义初始均匀温度为 23
BFA,1,TEMP,253                           !将密封垫的温度升至 253
TIME,2                                   !定义求解时间为 2
AUTOTS,1                                 !激活自动时间步
NSUBST,30,50,20 ,1
KBC,0                                    !使用斜坡加载方式
LSWRITE,2,                               !写入第二个载荷步文件

ESEL,S,,,3251,3268                       !选择单元号从 3251 到 3268 的所有单元
SFE,ALL,1,PRES,,500                      !施加流体压力渗透载荷
SFE,3268,2,PRES,,2                       !设置开始点
ALLSEL,ALL                               !选择所有实体
TIME,3                                   !定义求解时间为 3
AUTOTS,1
NSUBST,50,100,40 ,1
KBC,0
LSWRITE,3,                               !写入第三个载荷步文件
LSSOLVE,1,3,1                            !按载荷步求解
```



第 5 章　金属塑性成型的非线性有限元分析

5.1　引言

本章的工程实例表明 Rezoning 在金属成型分析中的有效性和实用性。ANSYS 的 Rezoning 功能有利于提高存在扭曲单元的非线性有限元分析中的收敛性。

有限元法在复杂的金属成型的设计和分析中起着重要的作用，并且能够显著改善产品性能。由于金属塑性成型过程中包含了非线性计算，因此成功模拟金属塑性成型是一项非常复杂的工作。材料成型包括了大变形、弹塑性和接触分析。网格重分对克服收敛困难是一个强有力的工具。

5.2　几何模型

一个金属块在模具的作用下被挤压成型为飞轮圆盘，所以这一问题具有轴对称性质，如图 5-1 所示为金属塑性成型的轴对称力学模型，模型的几何参数如下：H=169mm，H_1=57.68mm，圆角中心 1 和 2 到金属件顶部的距离为 1.6mm，圆角中心 3 到金属件底部的距离 H_3=1.6mm，圆角中心 4 到金属件底部的距离为 5.6mm，圆角中心 5 到金属件底部的距离为 −3.68mm，负号表示圆角中心 5 在金属件底部的下方，L=35mm，L_1=25.8mm，L_2=15.2mm，L_3=29.8mm，L_4=34.72mm，五个圆角半径分别为 R_1=8mm，R_2=8mm，R_3=8mm，R_4=4mm，R_5=4mm。

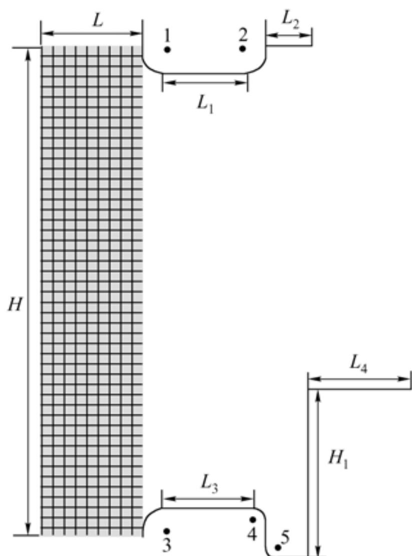


图 5-1　金属塑性成型的轴对称力学模型

5.3　材料的本构关系

本章实例中的成型材料为 AISI8620 合金，其弹性模量为 200GPa、泊松比为 0.3。假设材料屈服后的应力−应变关系为等向非线性强化模型，其应力−应变关系如下所示

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_0}=\left(\frac{\sigma_y}{\sigma_0}+\frac{3G}{\sigma_0}\bar{\varepsilon}^p\right)^N \tag{5-1}$$

其中，σ_y 为当前屈服应力；σ_0 为初始屈服应力，σ_0=385.4MPa；G 为剪切模量；N 为幂率值，N=0.13；ε^p 为等效塑性应变。

5.4 单元的选择

本章实例选用 PLANE182 单元模拟塑性成型金属材料，并设置 PLANE182 的单元行为为轴对称，单元算法为位移/力混合算法。

5.5 边界条件和载荷

固定下方的刚性模具，将上方的刚性模具竖直向下移动 138mm。

5.6 GUI 操作

5.6.1 前处理

1. 定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入，“Metal Forming”，单击“OK”按钮。

2. 定义参数

在命令输入窗口中输入：H=169，H1=57.68，H2=1.6，H3=1.6，H4=5.6，H5=3.68，L=35，L1=25.8，L2=15.2，L3=29.8，L4=34.72，R1=8，R2=8，R3=8，R4=4，R5=45.7。

3. 选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 4 node 182 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 PLANE182。然后单击“Options”按钮，在弹出的对话框中设置单元行为（Element behavior）为轴对称（Axisymmetric）；单元计算公式（Element formulation）为位移和力混合计算公式（Mixed U/P）,单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮，关闭对话框。

4. 定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 5-2 所示，输入 EX=2E5，PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框；继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Nonlinear，弹出非线性各向同性材料模型定义面板，如图 5-3 所示，输入 Sigy0=385.4、R0=0.134，单击“OK”按钮，选择 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

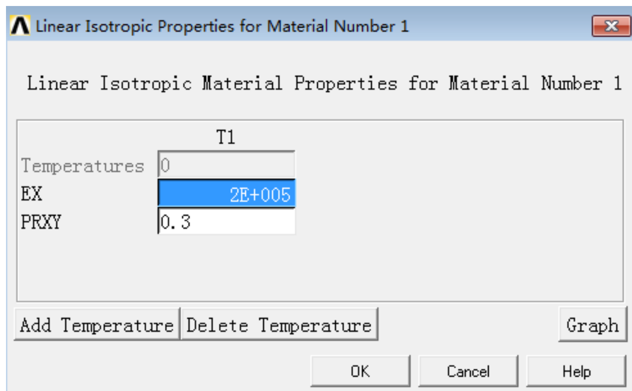


图 5-2 各向同性线弹性材料定义面板

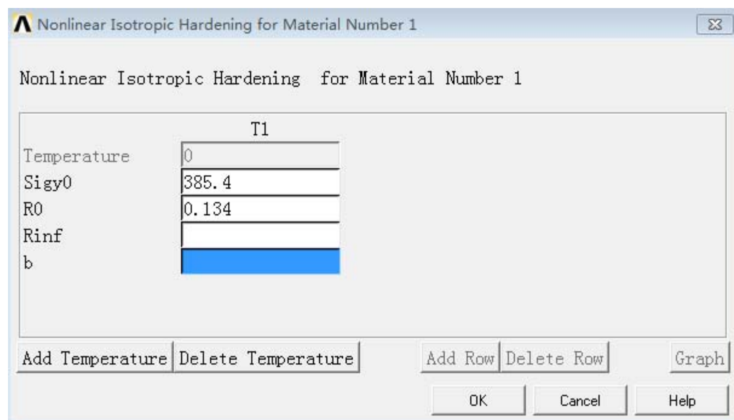


图 5-3 非线性各向同性材料模型定义面板

5. 建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出定义关键点面板，如图 5-4 所示，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=0，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2，X=L，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=L，Y=H，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X=0，Y=H，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X=0，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6，X=L，Y=0，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7，X=L，Y=H3，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点为 8，X=L，Y=H3+R3，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点为 9，X= L+R3+L3+R4，Y=H3+R3，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 10，X= L+R3+L3+R4，Y= −H5−R5，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 11，X= L+R1+L1+R2+L2，Y= −H5−R5，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 12，X= L+R1+L1+R2+L2，Y= H1−H5−R5，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 13，X= L+R1+L1+R2+L2+L4，Y= H1−H5−R5，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键

点号为 14，X= L+R1+L1+R2+L2，Y= H，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 15，X= L+R1+L1+R2，Y= H，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 16，X= L+R1+L1+R2，Y= H−R2−H2，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 17，X= L，Y=H−R1−H2，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 18，X= L，Y=H−H2，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 19，X= L，Y= H，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 20，X= 0，Y= H，Z=0，单击“OK”按钮。

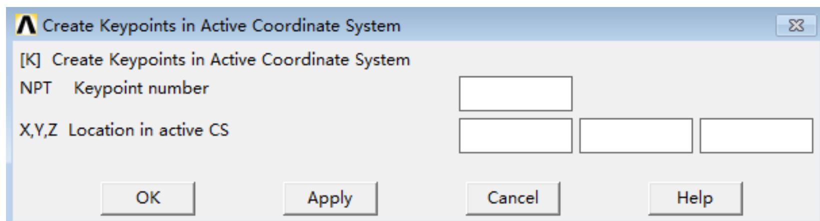


图 5-4　定义关键点面板

（2）定义矩形面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，弹出拾取对话框，如图 5-5 所示，输入 1，2，3，4，单击“OK”按钮。

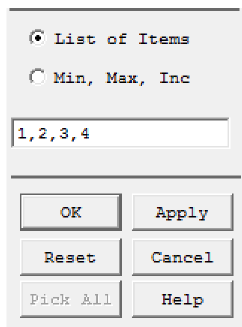


图 5-5　拾取对话框

（3）定义直线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 5 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 6 和 7，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 7 和 8，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 8 和 9，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 9 和 10，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 10 和 11，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 11 和 12，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 12 和 13，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 14 和 15，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 15 和 16，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 16 和 17，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 17 和 18，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 17 和 18，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 18 和 19，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 19 和 20，单击“OK”按钮。

（4）定义圆角

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Line Fillet，弹出拾取对话框，拾取线 L16 和 L15，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 5-6 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为 R1，单击“Apply”按钮；返回拾取对话框，继续拾取线 L15 和 L14，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 5-6 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为 R2，单击“Apply”按钮；返回拾取对话框，继续拾取线 L7 和 L8，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 5-6 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为 R3，单击“Apply”按钮；返回拾取对话框，继续拾取线 L8 和 L9，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 5-6 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为 R4，单击“Apply”按钮；返回拾取对话框，继续拾取线 L9 和 L10，单击“OK”按钮，弹出直线圆角

设置面板，如图 5-6 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为 R5，单击“OK”按钮。

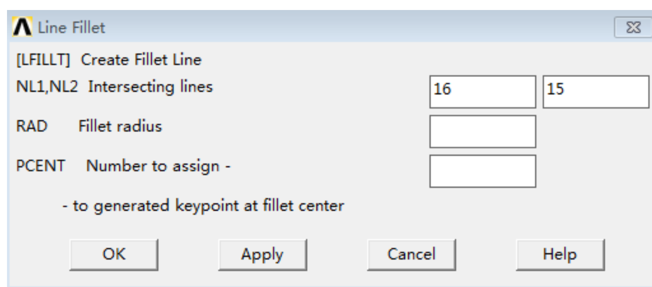


图 5-6 直线圆角设置面板

（5）删除多余关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Keypoints，弹出拾取对话框，如图 5-7 所示，输入 17，16，8，9，10，单击“OK”按钮。

6. 网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Tool

（2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 5-8 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 5-9 所示。

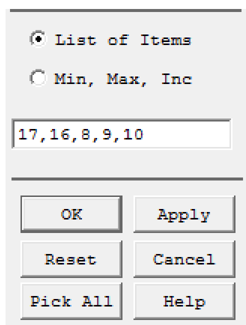


图 5-7 拾取对话框

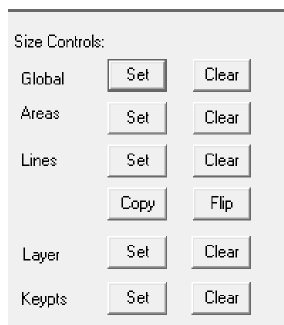


图 5-8 网格划分工具面板中的尺寸控制子面板

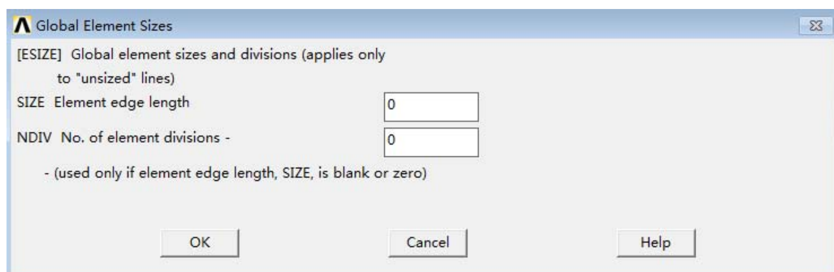


图 5-9 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 35/9，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取轴对称金属面，单击“OK”按钮。

7. 定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出接触管理器面板，如图 5-10 所示。

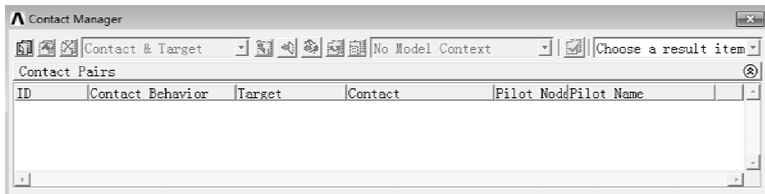


图 5-10　接触管理器面板

（2）创建上部刚性模具与成型金属的刚-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出的目标面及目标单元类型设置面板，如图 5-11 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取组成上部刚性模具的线 L13、L14、L16、L15、L19、L17 和 L18，单击“Apply”按钮；然后单击图 5-11 所示的“Next”按钮，弹出设置刚体控制节点的位置面板，图 5-12 所示，在面板中选择拾取存在的自由关键点（Pick existing free keypoint...）作为刚体控制节点，单击“Pick Entity”按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 14，单击“Apply”按钮；单击图 5-12 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，图 5-13 所示，在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact...），拾取线 L2 和 L3，单击“Apply”按钮；单击图 5-13 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 5-14 所示，在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0，单击“Create”按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看需要将目标单元的法向反转，单击“Filp Target Normals”按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L18、L17、L15、L14 和 L13，单击“OK”按钮完成目标单元的法向反转。

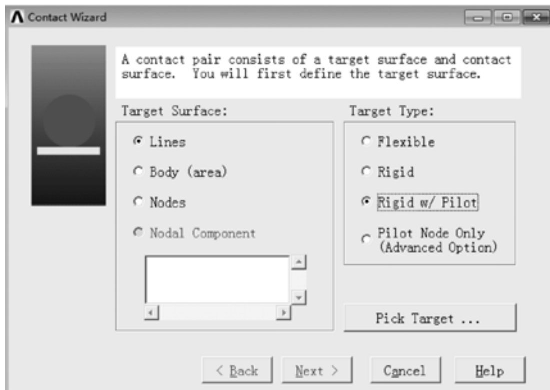


图 5-11　目标面及目标单元类型设置面板

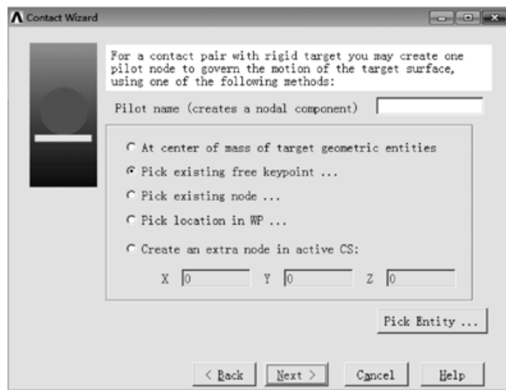


图 5-12　设置刚体控制节点的位置面板

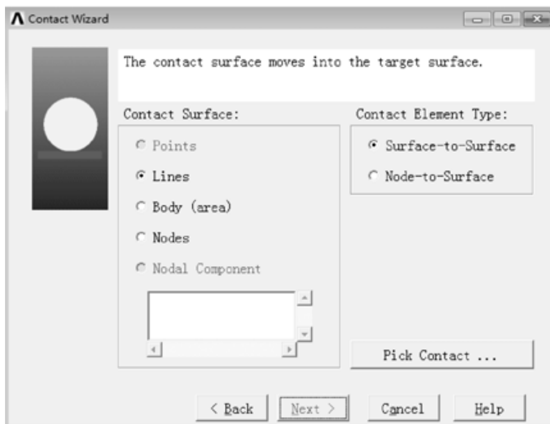


图 5-13 接触面及接触单元类型设置面板

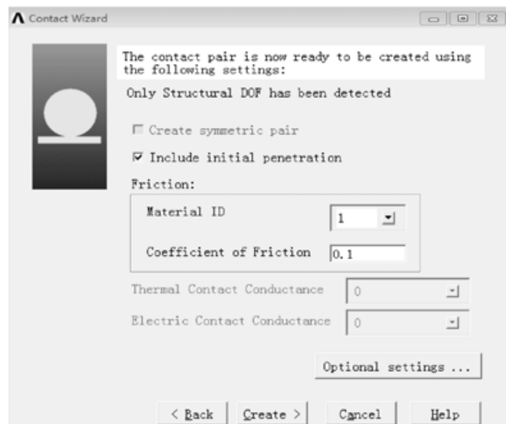


图 5-14 创建接触对面板

（3）创建下部刚性模具与成型金属的刚-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 5-11 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取组成上部刚性模具的线 L5、L6，L20、L8、L7、L9、L21、L10、L11 和 L12，单击“Apply”按钮；然后单击图 5-11 所示的“Next”按钮，弹出设置刚体控制节点的位置面板，如图 5-12 所示，在面板中选择拾取存在的自由关键点（Pick existing free keypoint...）作为刚体控制节点，单击“Pick Entity”按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 13，单击“Apply”按钮，单击图 5-12 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact…），拾取线 L1 和 L2，单击“Apply”按钮；单击图 5-13 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 5-14 所示，在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0，单击“Create”按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看需要将目标单元的法向反转，单击“Filp Target Normals”按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L5、L6、L20、L8、L7、L9、L21、L10、L11 和 L12，单击“OK”按钮完成目标单元的法向反转。

5.6.2 求解

1. 设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 5-15 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出如图 5-16 所示的静态分析选项设置面板，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

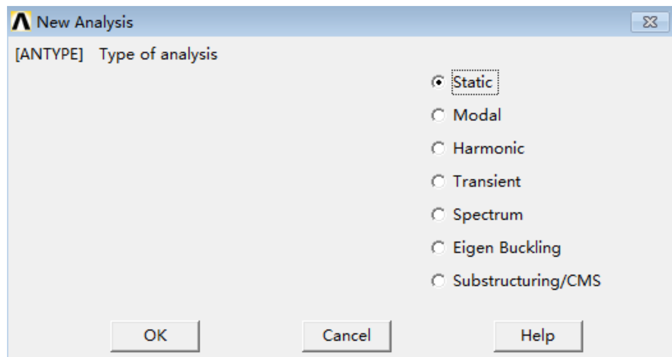


图 5-15 分析类型设置面板

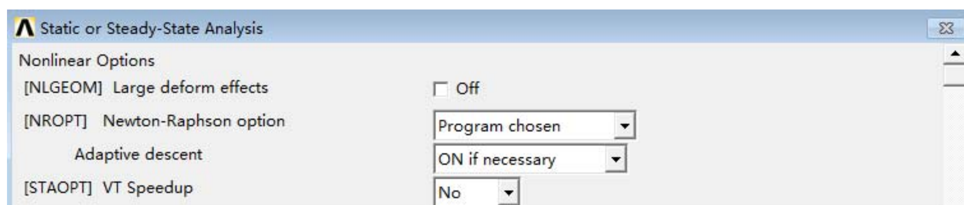


图 5-16 静态分析选项设置面板

2. 定义边界条件

（1）提取控制节点编号

在命令窗户输入以下命令流来提取控制节点编号：

N1=NODE(L+R1+L1+R2+L2+L4,H1-H5-R5,0)

（2）固定约束底部刚性模具

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，输入 N1，单击“OK”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 5-17 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 All DOF，单击“OK”按钮。

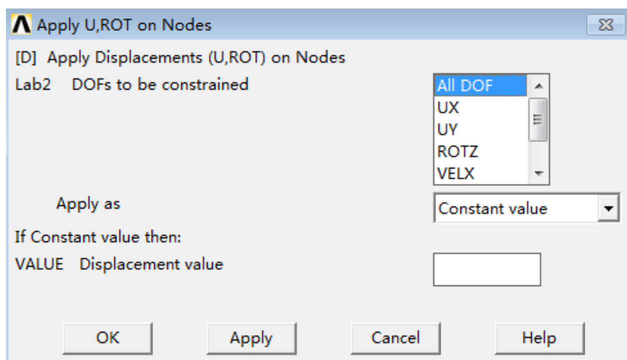


图 5-17 约束节点自由度设置面板

（3）对成型金属施加横向位移约束

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On

Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L4，单击“OK”按钮，弹出约束线自由度设置面板，如图 5-18 所示，选择约束自由度类型为 UX，单击“OK”按钮。

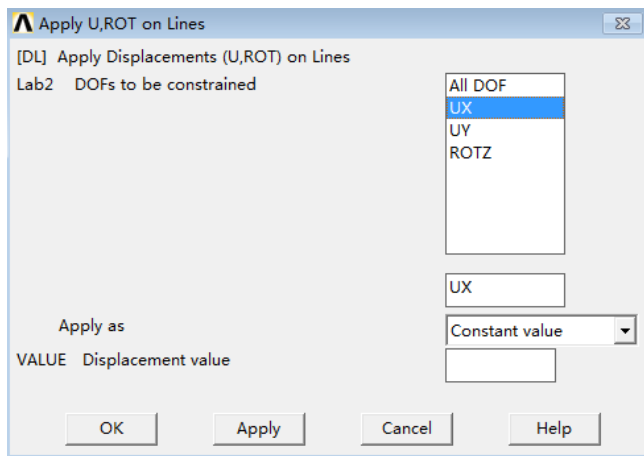


图 5-18 约束线自由度设置面板

3. 定义载荷

（1）提取控制节点编号

在命令窗户输入以下命令流来提取控制节点编号：

N2=NODE(L+R1+L1+R2+L2,H,0)

（2）移动上部刚性模具

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，输入 N2，单击“OK”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 5-19 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UY，输入位移值（Displacement value）为-138，单击“OK”按钮。

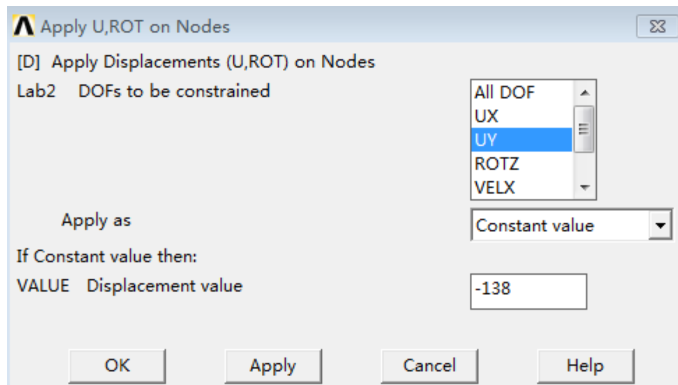


图 5-19 约束节点自由度设置面板

4. 定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出

计算结果输出控制面板，如图 5-20 所示，选择 Every substep，单击“OK”按钮。

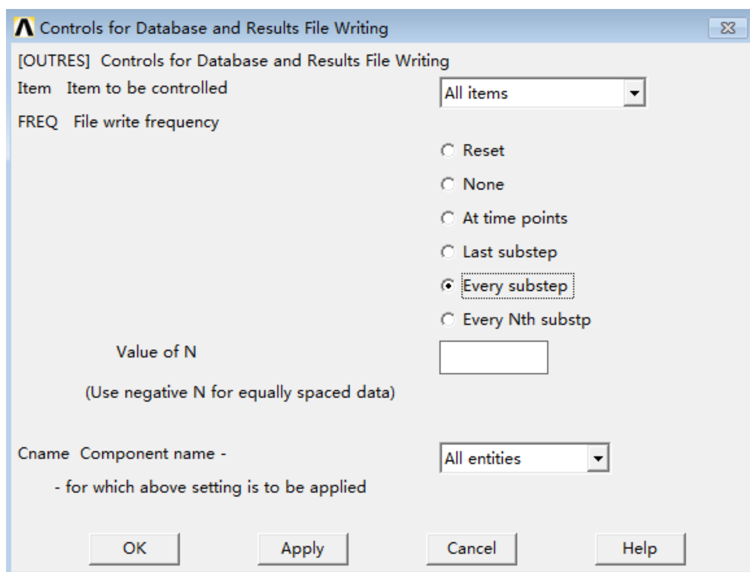


图 5-20　计算结果输出控制面板

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps Options，弹出时间和子步选项设置面板，如图 5-21 所示，计算时间（Time at end of Load Step）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 10，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 100 和最小子步数（Minimum no. of substeps）为 10。



图 5-21　时间和子步选项设置面板

（3）设置重启动选项

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Multi-FrameRestart

Control，弹出重启动设置面板，弹出如图 5-22 所示，设置重启动动作（Action）为定义（Define），重启载荷步（Load Step）为全部子步（All），文件写入频率（File write frequency）为全部写入（All），单击“OK”按钮。

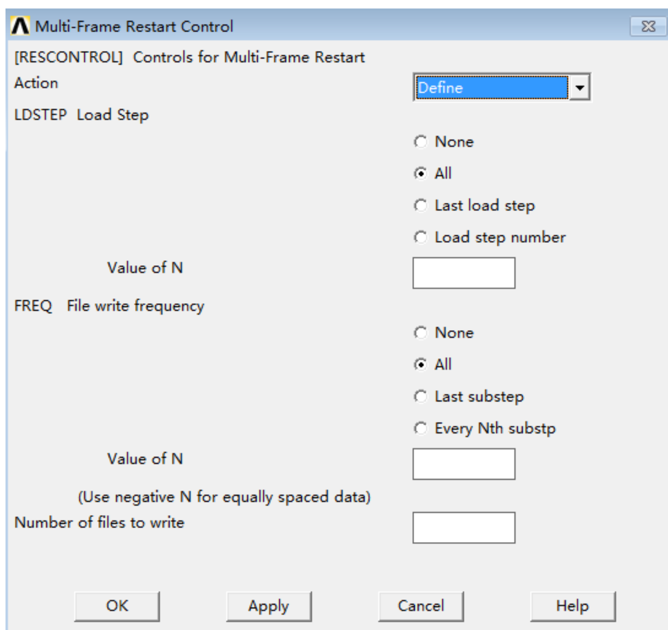


图 5-22 重启动设置面板

5. 求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。当求解到 T=0.96178，由于网格发生扭曲而终止求解，图 5-23 给出了此时的网格变形情况，接下来将采用重分网格技术解决这一问题。

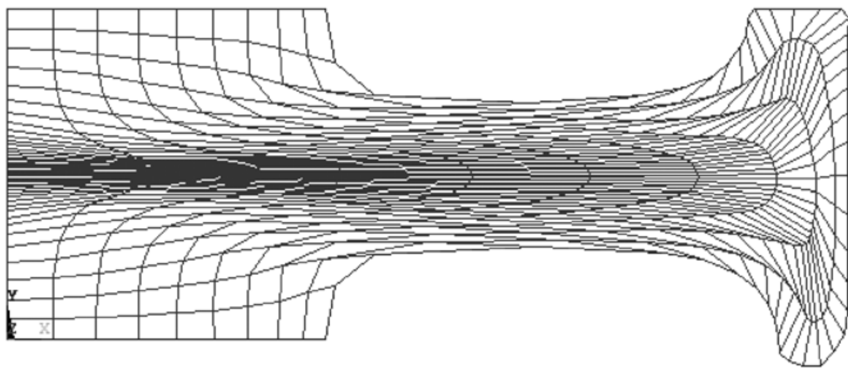


图 5-23 求解时间 T=0.96178 的网格变形情况

6. 第一次重分网格

（1）确定开始重分网格的子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Start，弹出选择重分子步设置面

板，如图 5-24 所示，选择第 26 个子步开始重分网格，单击“View Deformed Geometry”按钮，弹出第 26 个子步对应的网格变形图，如图 5-25 所示，最后单击“OK”按钮。

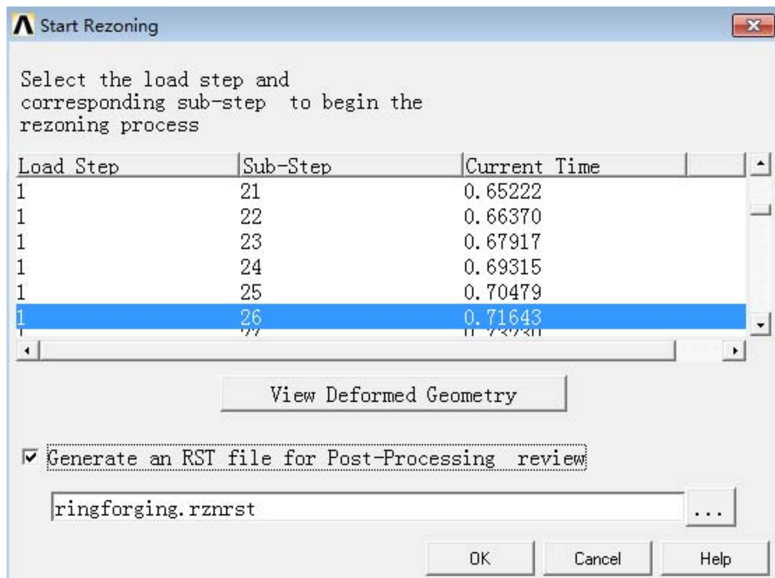


图 5-24 选择重分子步设置面板

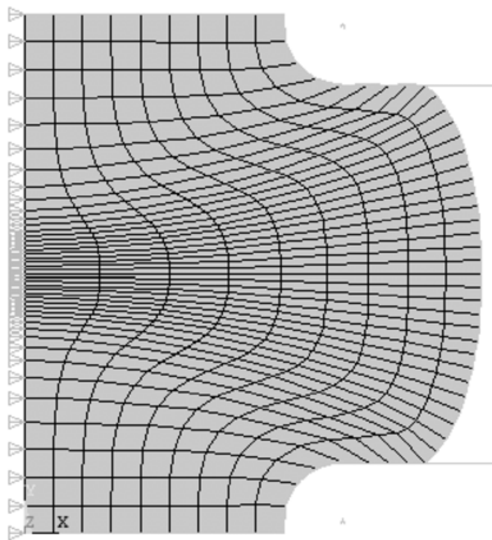


图 5-25 第 26 个子步对应的网格变形图

（2）创建重分网格面

本实例选择整个区域进行重分网格面，因此可以直接创建重分网格面，操作路径 GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Create Remesh Zone(s) →Create Rezone Area，弹出创建面区域设置面板，如图 5-26 所示，保持默认设置，单击“OK”按钮。

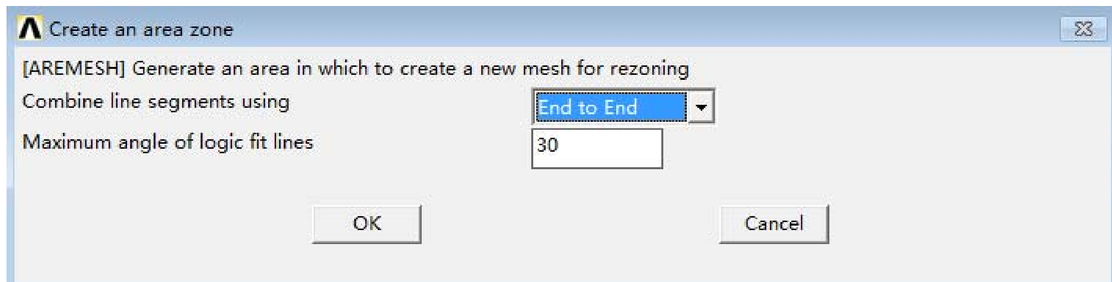


图 5-26　创建面区域设置面板

图 5-27 给出了创建完毕的重分网格的面区域。

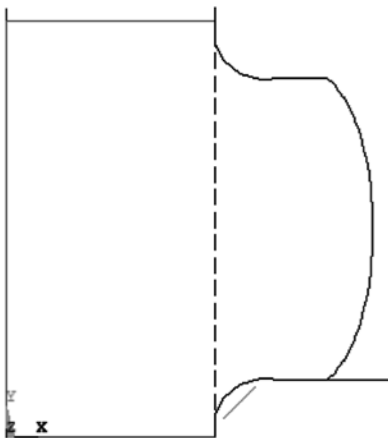


图 5-27　重分网格的面区域

（3）重新划分新面的单元

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Mesh Controls→Mesh Tool，打开网格划分工具面板，单击该面板上尺寸控制区域（Size Controls）中总体（Global）尺寸设置（Set）按钮，弹出总体单元尺寸设置面板，如图 5-28 所示，在面板中的单元边界尺寸（Element edge length）中输入 2.5，单击“OK”按钮。

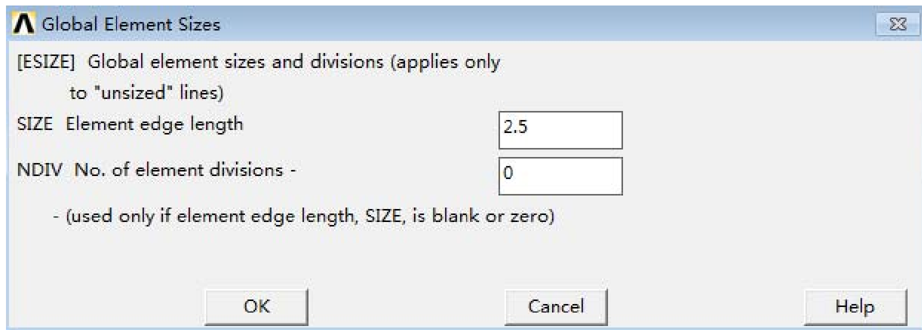


图 5-28　总体单元尺寸设置面板

单击网格划分工具面板上的 Mesh 按钮，弹出选择对话框，选择需要重新划分网格的面，单击“OK”按钮，弹出重分网格后单元，如图 5-29 所示。

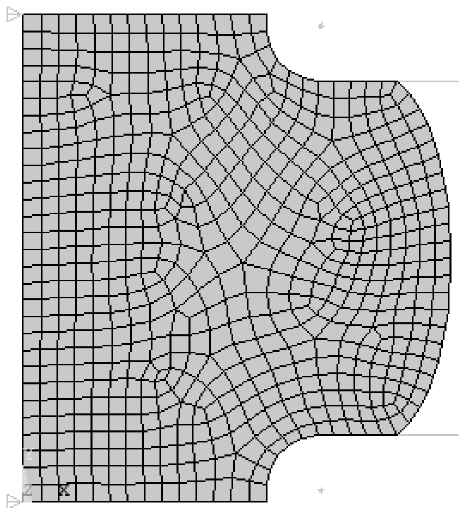


图 5-29　重分网格后的单元

（4）完成重分网格

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Finish，弹出完成重分网格的消息面板，如图 5-30 所示，单击“OK”按钮。

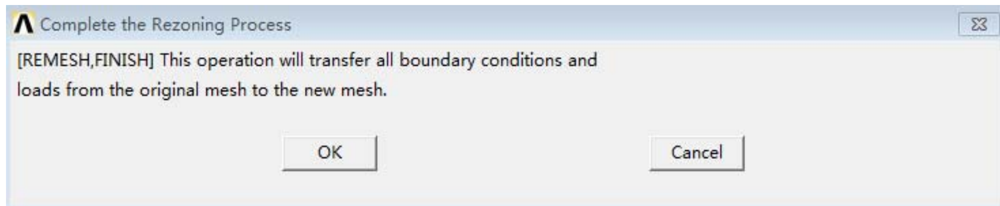


图 5-30　完成重分网格的消息面板

（5）将旧网格结果映射到新网格

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Map Results，弹出映射结果设置面板，如图 5-31 所示，在面板中输入最大迭代子步数为 50，单击“OK”按钮。

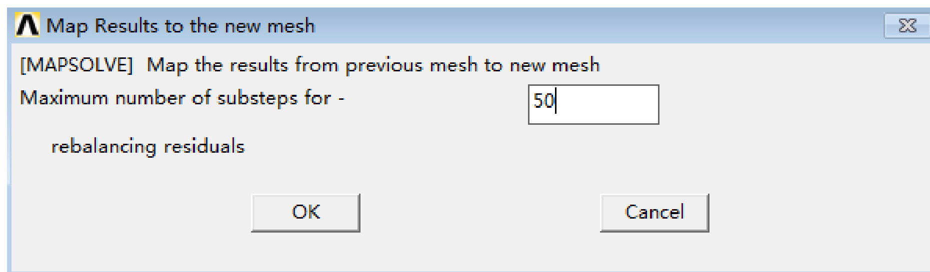


图 5-31　映射结果设置面板

7. 再次求解

（1）完成求解

GUI：单击 Main Menu→Finish

（2）重新进入求解设置重启动

GUI：单击 Main Menu→Analysis Type→Restart，弹出重启动设置面板，如图 5-32 所示，保持面板默认设置，单击“OK”按钮。

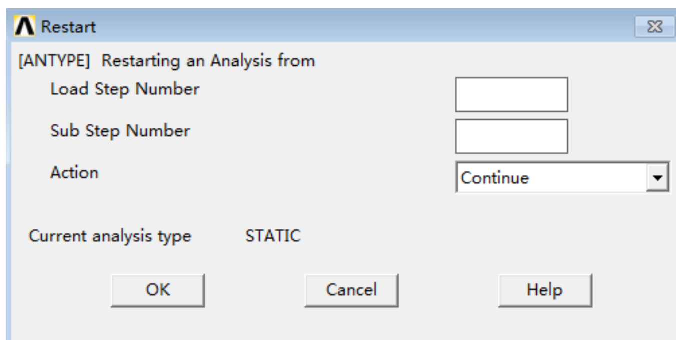


图 5-32 重启动设置面板

（3）开始求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，开始求解。当求解到 T= 0.9971426，由于网格发生扭曲而终止求解，接下来将进行第二次重分网格。

8. 第二次重分网格

（1）确定开始重分网格的子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Start，弹出选择重分子步设置面板，如图 5-33 所示，选择第 48 个子步开始重分网格，单击“OK”按钮。

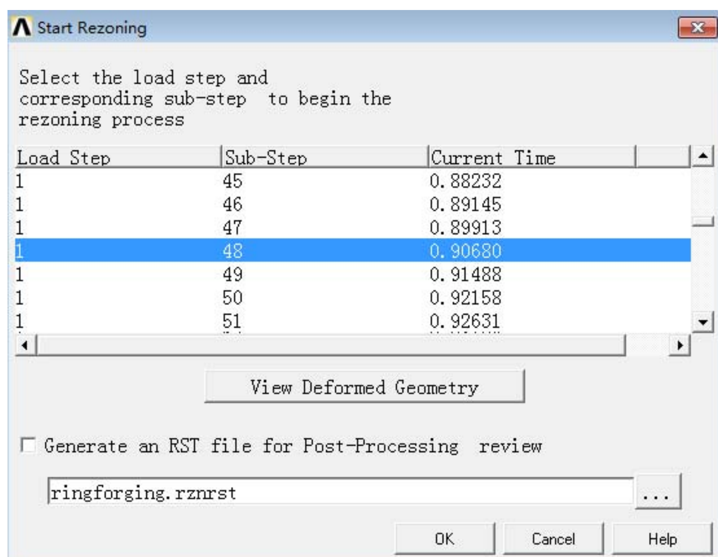


图 5-33 选择重分子步设置面板

（2）创建重分网格面

本章实例选择整个区域进行重分网格面，因此可以直接创建重分网格面，操作路径 GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Create Remesh Zone(s)→Create Rezone Area，弹出创建面区域设置面板，如图 5-26 所示，保持默认设置，单击“OK”按钮。

（3）重新划分新面的单元

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Mesh Controls→MeshTool，打开网格划分工具面板，单击该面板上尺寸控制区域（Size Controls）中总体（Global）尺寸设置（Set）按钮，弹出总体单元尺寸设置面板，如图 5-34 所示，在面板中的单元边界尺寸（Element edge length）中输入 2.2，单击“OK”按钮。

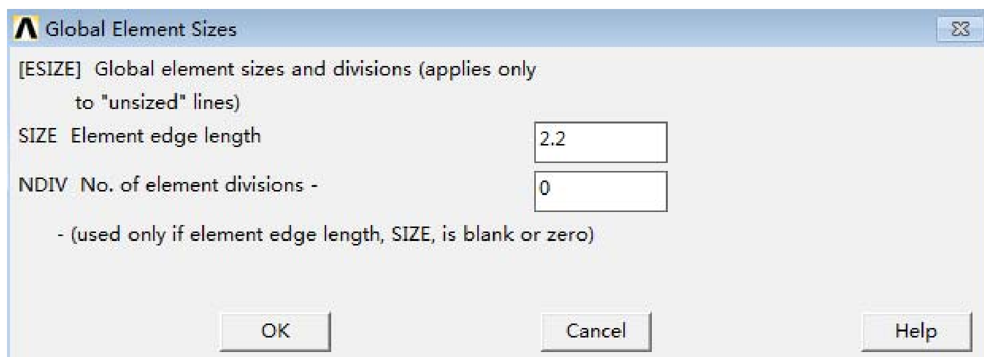


图 5-34　总体单元尺寸设置面板

单击网格划分工具面板上的 Mesh 按钮，弹出选择对话框，选择需要重新划分网格的面，单击“OK”按钮，弹出重分网格后的单元，如图 5-35 所示。

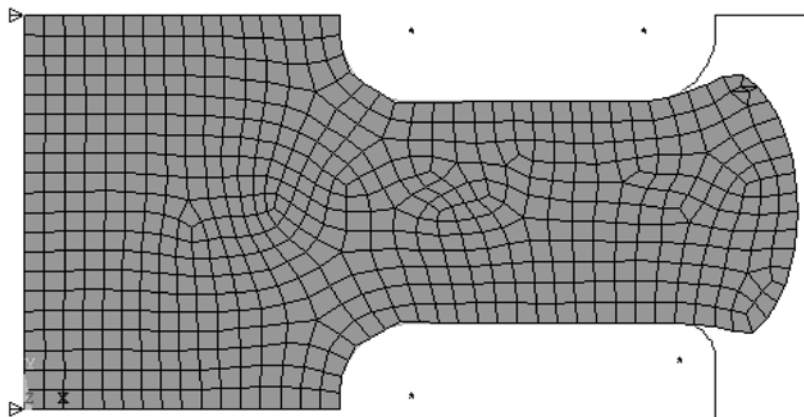


图 5-35　重分网格后的单元

（4）完成重分网格

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Finish，弹出完成重分网格的消息面板，如图 5-36 所示，单击“OK”按钮。

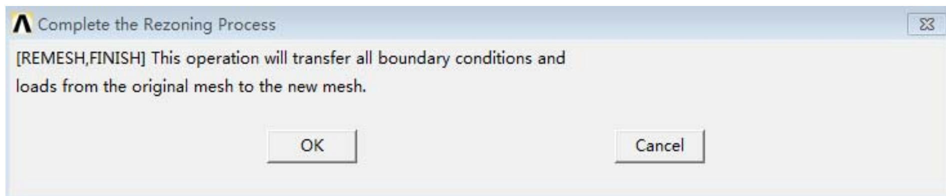


图 5-36　完成重分网格的消息面板

（5）将旧网格结果映射到新网格

GUI：单击 Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Map Results，弹出映射结果设置面板，如图 5-37 所示，在面板中输入最大迭代子步数为 50，单击“OK”按钮。

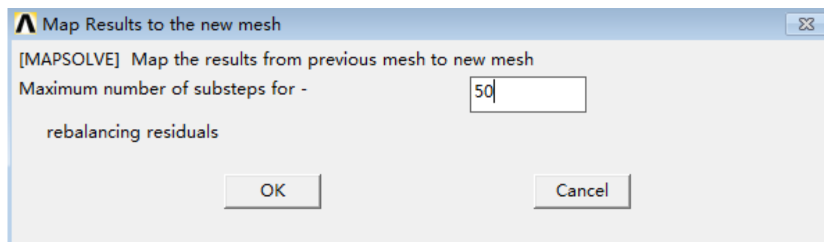


图 5-37　映射结果设置面板

9. 再次求解

（1）完成求解

GUI：单击 Main Menu→ Finish。

（2）重新进入求解设置重启动

GUI：单击 Main Menu→Analysis Type→Restart，弹出重启动设置面板，如图 5-38 所示，保持面板默认设置，单击“OK”按钮。

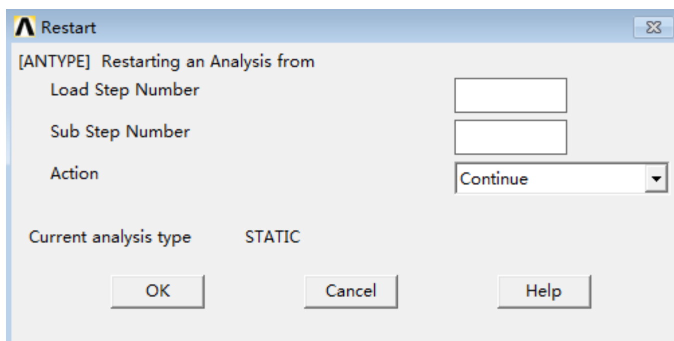


图 5-38　重启动设置面板

（3）开始求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，开始求解。

5.6.3 后处理

图 5-39～图 5-45 分别给出了金属成型过程中的不同时刻的等效应力云图，由图 5-39～

图 5-41 可知，在金属成型过程中，其等效应力持续增加，最终达到 1043.8MPa。图 5-42 给出了成型后的金属等效塑性应变云图，由图 5-42 可知，最大的等效塑性应变发生在成型金属的截面中心处，最大值为 3.53378，图 5-43 给出了成型后的金属弹性应变能密度云图，由图 5-43 可知，最大弹性应变能密度为 584.762，图 5-44 给出了成型后的金属塑性应变能密度云图，由图 5-44 可知，最大塑性应变能密度为 3293.82。

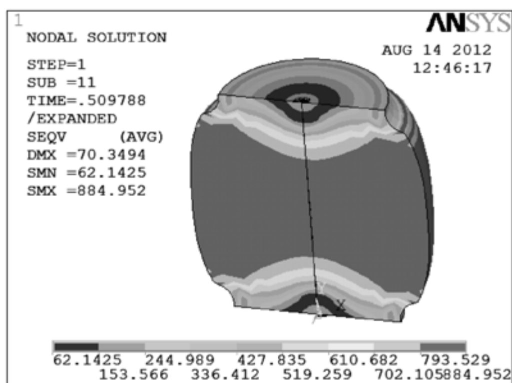


图 5-39　11 子步时的等效应力云图

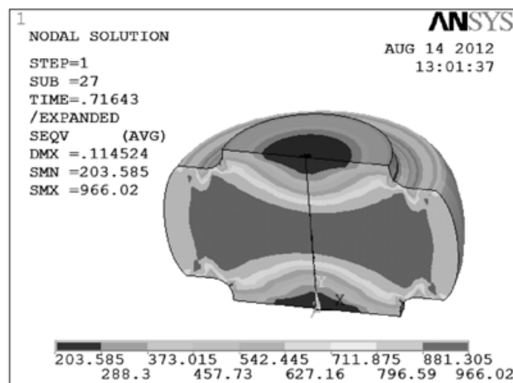


图 5-40　27 子步时的等效应力云图

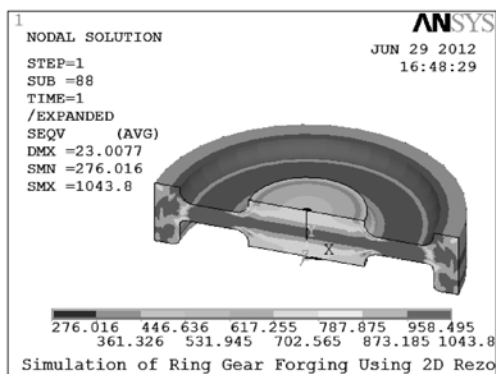


图 5-41　成型后的金属等效应力云图

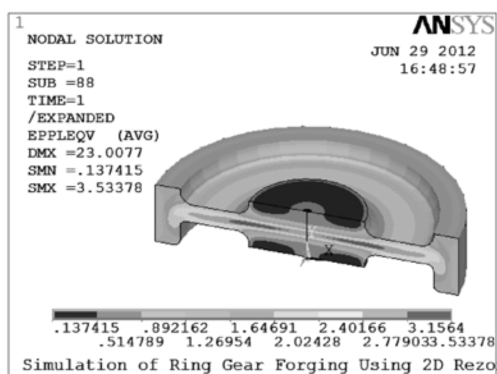


图 5-42　成型后的金属等效塑性应变云图

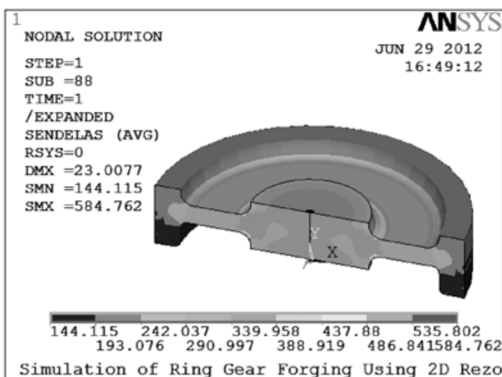


图 5-43　成型后的金属弹性应变能密度云图

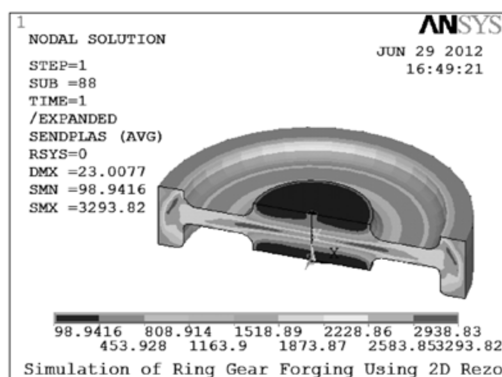


图 5-44　成型后的金属塑性应变能密度云图

图 5-45 给出了成型后的接触压力云图，由图 5-45 可知，在金属的过渡区域，接触压力较大，最大值为 27171.5MPa。图 5-46 给出了成型后的接触状态云图，由图 5-46 可知，成型的主要接触状态为滑动接触状态。

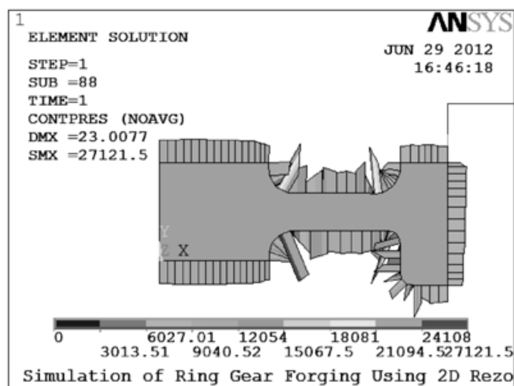


图 5-45 成型后的接触压力云图

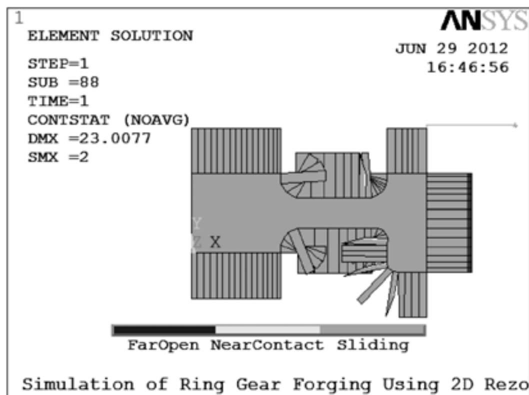


图 5-46 成型后的接触状态云图

5.7 命令流

```
/FILNAME,Metal Forming,0   !定义文件名
/PREP7
!定义参数
H=169
H1=57.68
H2=1.6
H3=1.6
H4=5.6
H5=3.68
L=35
L1=25.8
L2=15.2
L3=29.8
L4=34.72
R1=8
R2=8
R3=8
R4=4
R5=4
ET,1,PLANE182   !定义单元
KEYOPT,1,3,1    !设置为平面应变
KEYOPT,1,6,1    !设置单元算法为力/位移混合算法
MP,EX,1,200E3   !定义弹性模量
MP,PRXY,1,0.3   !定义泊松比
```

```
TB,NLIS,1,1,4,POWER    !激活非线性强化模型
TBTEMP,0
TBDATA,,385.4,0.13,,,,
!定义关键点
K,1,0,0,0
K,2,L,0,0
K,3,L,H,0
K,4,0,H,0
K,5,0,0,0
K,6,L,0,0
K,7,L,H3,0
K,8,L,H3+R3,0
K,9,L+R3+L3+R4,H3+R3,0
K,10,L+R3+L3+R4,-H5-R5,0
K,11,L+R1+L1+R2+L2,-H5-R5,0
K,12,L+R1+L1+R2+L2,H1-H5-R5,0
K,13,L+R1+L1+R2+L2+L4,H1-H5-R5,0
K,14,L+R1+L1+R2+L2,H,0
K,15,L+R1+L1+R2,H,0
K,16,L+R1+L1+R2,H-R2-H2,0
K,17,L,H-R1-H2,0
K,18,L,H-H2,0
K,19,L,H,0
K,20,0,H,0
!定义面
A,1,2,3,4
!定义线
L,5,6
L,6,7
L,7,8
L,8,9
L,9,10
L,10,11
L,11,12
L,12,13
L,14,15
L,15,16
L,16,17
L,17,18
L,18,19
L,19,20
!定义线的圆角
LFILLT,16,15,R1, ,
LFILLT,15,14,R2, ,
LFILLT,7,8,R3, ,
LFILLT,8,9,R4, ,
```



```
LFILLT,9,10,R5, ,
!删除关键点 17，16，8，9，10
KDELE,17
KDELE,16
KDELE,8
KDELE,9
KDELE,10
!定义总体网格尺寸
ESIZE,35/9,0,
AMESH,1 !划分网格
!使用接触向导定义接触对
!* 具体命令流参见本章的光盘中的命令流
/SOL
ANTYPE,0 !激活静力学求解
NLGEOM,1 !激活大变形
!定义边界条件
N1=NODE(L+R1+L1+R2+L2+L4,H1-H5-R5,0) !获取指定位置的节点号
D,N1, , , , , ,ALL, , , , , !约束节点 N1 所有方向的约束
DL,4, ,UX, !约束线 4 的 X 方向位移
!定义载荷
N2=NODE(L+R1+L1+R2+L2,H,0) !获取指定位置的节点号
D,N2, ,-138, , , ,UY, , , , , !施加节点 N2 的 Y 方向位移为-138
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL, !输出所有子步
TIME,1         !定义求解结束时间为 1
AUTOTS,1    !激活自动时间步
NSUBST,20,2000,10 !定义求解子步数
KBC,0 !设置载荷为斜坡载荷
RESCONTRL,DEFINE,ALL,ALL,-1    !设置重启动
SOLVE!开始求解
/SOL
!第一次重分网格
rezone,manual,1,26    !指定重分网格的子步为 26
REMESH,START
!创建重分网格的面
 /UI,COLL,0
CMDEL,REZONE_CM
AREMESH,0,30,
/UI,COLL,1
ESIZE,2.5,0,       !设置总体尺寸为 2.5
MSHAPE,0,2D    !使用二维四边形网格
MSHKEY,0         !使用自由网格划分
AMESH,2          !划分面 2
REMESH,FINISH
AREMESHCN
MAPSOLVE,50, !开始网格映射求解
```

```
FINISH
/SOLUTION
ANTYPE,,RESTART !激活重启动
SOLVE   !开始求解
FINISH
!第二次重分网格
REZONE,MANUAL,1,48   !指定重分网格的子步为 26
REMESH,START
!创建重分网格的面
/UI,COLL,0
CMDEL,REZONE_CM
AREMESH,0,30,
/UI,COLL,1
ESIZE,2.2,0,        !设置总体尺寸为 2.5
MSHAPE,0,2D    !使用二维四边形网格
MSHKEY,0         !使用自由网格划分
AMESH,2          !划分面 2
REMESH,FINISH
AREMESHCN
MAPSOLVE,50, !开始网格映射求解
FINISH
/SOLUTION
ANTYPE,,RESTART !激活重启动
SOLVE   !开始求解
FINISH
```



第 6 章　功能梯度材料静、动态断裂力学分析

6.1　引言

随着航天航空等高新技术领域的飞速发展，对材料的性能要求也越来越高，为此功能梯度材料应运而生。由于功能梯度材料在诸多性能方面与均匀材料相比具有不可比拟的优势，因而在工程中有着十分广阔的应用前景。由于数学处理上的困难，目前所能分析的大多数功能梯度材料裂纹问题一般都假设材料是各向同性弹性体，只有极少数文献涉及各向异性功能梯度材料的裂纹问题。

1983 年，Delale 和 Erdogan 采用指数形式的材料物性参数模型和积分变换–奇异积分方程求解技术，对非均匀材料平面裂纹 I 、II 型问题进行了分析。结果表明:对于材料物性参数变化是连续、且连续可导的非均匀材料，其裂纹尖端应力奇异性与均匀材料相同。

目前，只有少量文献涉及在机械冲击载荷作用下功能梯度材料的动态断裂问题，由于问题的复杂性，这些文献大部分都局限于功能梯度材料的 III 型裂纹问题(反平面剪切或扭转)。采用解析途径分析功能梯度材料时常常要作较强的假定:含裂纹体无限大；材料梯度分布形式为某些特殊函数（如幂函数、指数函数等）；裂纹的取向平行或垂直于几何边界；材料变形为弹性变形等。为了分析更普遍的功能梯度材料，人们不得不借助数值方法。

功能梯度材料的数值研究方法多种多样，但由于有限单元法的适应性最强，因此在求解功能梯度材料断裂力学问题得到了广泛的应用。本实例将详解介绍功能梯度材料静态问题和动态问题的断裂参数计算方法。

6.2　几何模型

图 6–1 给出了功能梯度材料基体–涂层模型简图，其中基体材料为均匀材料，涂层为功能梯度材料，具体几何尺寸如下：L_1=0.2m，L_2=0.06m，H_1=0.15m，H_2=0.04m，裂纹半长 a=0.012m。

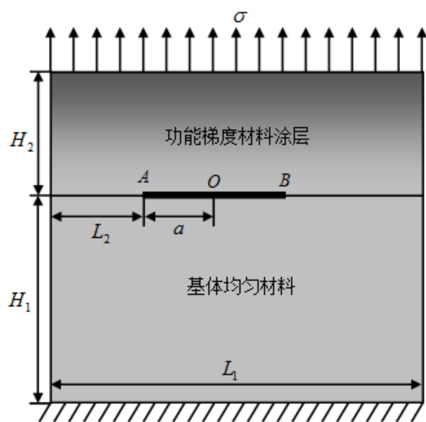


图 6–1　功能梯度材料基体-涂层模型简图

6.3　材料的本构模型

假设功能梯度涂层材料和基体均匀材料的应力-应变关系都为线弹性本构模型，图 6-2 给出了功能梯度材料基体-涂层的弹性模量与空间位置的关系，由图 6-2 可知基体均匀材料的弹性模量不随空间位置变化，为常量 E_1=100GPa，功能梯度涂层材料的弹性模量为空间坐标函数，变化关系如下：

$$E_2 = E_1 e^{\beta_E(y-H_1)} \tag{6-1}$$

式中，β_E 为功能梯度材料弹性模量非均匀参数。由于弹性模量在整个涂层-基体中具有空间的连续性，因此 β_E 与空间位置存在以下关系：

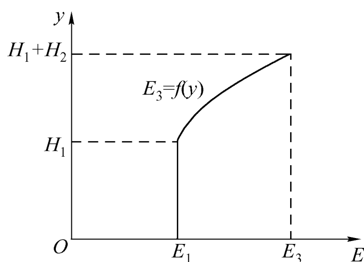


图 6-2　功能梯度材料基体-涂层的弹性模量与空间位置关系

$$\beta_E = \frac{1}{H_2}\ln\frac{E_3}{E_1} \tag{6-2}$$

式中，E_3 为涂层顶部的弹性模量，本实例取值为 1000GPa。基体和涂层材料的泊松比都取 0.3。对于动态断裂问题，其有限元列式为：

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+K\{u\}=\{F\} \tag{6-3}$$

式中，$[M]$ 为质量矩阵；$[C]$ 为阻尼矩阵；$[K]$ 为刚度矩阵；$\{F\}$ 为结构外载荷矢量；$\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度矢量；$\{\dot{u}\}$ 为节点速度矢量；$\{u\}$ 为节点位移矢量。

弹性模量和泊松比用于形成总体刚度矩阵，密度用于形成总体质量矩阵。本实例中的密度变化规律也符合指数变化规律：

$$\rho_2 = \rho_1 e^{\beta_\rho(y-H_1)} \tag{6-4}$$

式中，β_ρ 为功能梯度材料密度非均匀参数，由于密度在整个涂层-基体中具有空间的连续性，因此 β_ρ 与空间位置存在以下关系：

$$\beta_\rho = \frac{1}{H_2}\ln\frac{\rho_3}{\rho_1} \tag{6-5}$$

式中，ρ_1 为基体密度，ρ_3 为涂层顶部密度。本实例中 ρ_1=3000kg/m^3；ρ_3=8000kg/m^3。

6.4　单元的选择

本实例中采用 PLANE183 单元模拟裂纹尖端的奇异性，考虑到冲击载荷作用时，应力波的传导导致裂纹可能存在裂纹面相互嵌入的病态解，为了避免这个问题本实例在裂纹之间使用高阶的接触单元 CONTA173 和目标单元 TARGE169 组成接触对。

6.5　边界条件与载荷

如图 6-1 所示，功能梯度材料涂层-基体模型，基体底部固定约束，在静态分析中涂层顶部的承受应力 σ =10MPa。如图 6-3 所示，动态分析中涂层顶部承受冲击载荷幅值为

σ=10MPa，作用时间为t_1=0.00005s，计算时间t_2=0.0005s，质量阻尼系数为 0.000002，刚度阻尼系数为 0.00001。

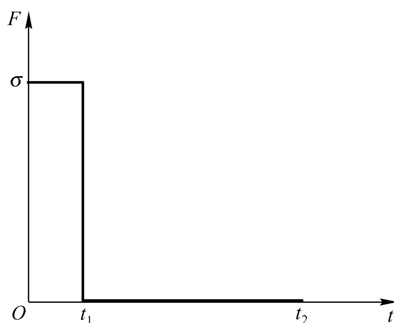


图 6-3 冲击载荷与时间关系

6.6 GUI 操作

6.6.1 前处理

1. 定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“The Torque and bending moment Analysis in ANSYS”，单击“OK”按钮。

2. 定义参数

在命令输入窗口中输入：L1=0.2，L2=0.06，H1=0.15，H2=0.04，A=0.012，E1=1E11，E3=10E11，V=0.3，ROU1=3000，ROU3=8000，BEITAE=1/H2*LOG(E3/E1)，BEITAROU=1/H2*LOG(ROU3/ROU1)，功能梯度材料涂层划分层数 N=15。

3. 选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 8 node 183 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 PLANE183。然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置单元行为（Element behavior）为平面应变（Plane strain），单击“OK”按钮，返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

4. 定义材料模型

对于功能梯度材料，使用分层方法模拟材料的物性参数连续变化的特点，本实例中将功能梯度材料涂层划分 15 层，为了提高分析效率，因此使用命令流方式定义材料模型。

```
MP,EX,1,E1              !定义基体均匀材料的弹性模量
MP,PRXY,1,V             !定义基体均匀材料的泊松比
MP,DENS,1,ROU1          !定义基体均匀材料的密度
```

```
!定义功能梯度材料涂层的材料参数
J=2
*DO,I,1,2*N-1,2
MP,EX,J,E1*EXP(BEITAE*(H2/2/N*I))
MP,PRXY,J,V
MP,DENS,J,ROU1*EXP(BEITAROU*(H2/2/N*I))
J=J+1
*ENDDO
```

5. 建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出定义关键点面板，如图 6-4 所示，在该面板中输入关键点号（Keypoint number）为 1，然后继续输入在激活坐标系对应的坐标 X=0、Y=0 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2 和对应的坐标 X=L1、Y=0 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3 和对应的坐标 X=L1、Y= H1 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4 和对应的坐标 X=L1、Y=H1+H2 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5 和对应的坐标 X=0、Y=H1+H2 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6 和对应的坐标 X=0、Y=H1 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7 和对应的坐标 X=L2、Y=H1 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 8 和对应的坐标 X= L2+A、Y=H1 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 9 和对应的坐标 X=L2+2*A、Y=H1 和 Z=0，单击“OK”按钮。

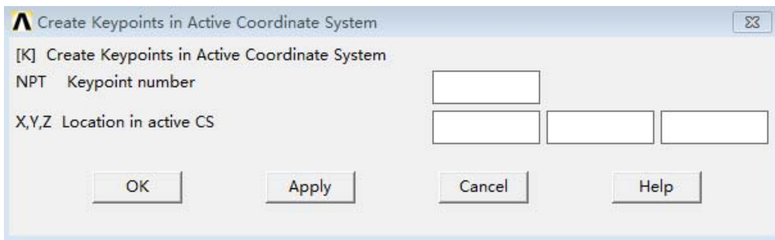


图 6-4 定义关键点面板

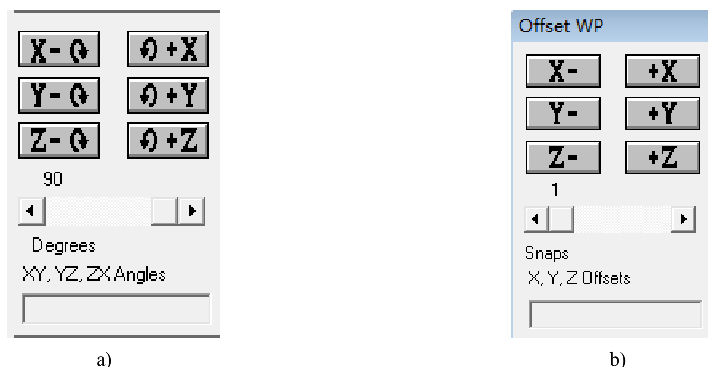
（2）定义面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，弹出拾取对话框，拾取关键点 1、2、3、9、7 和 6，单击“Apply”按钮，继续拾取关键点 5、6、7、8、9、3 和 4，单击“OK”按钮。

（3）使用工作平面分割面

1）移动工作平面

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments，弹出偏移工作设置面板，如图 6-5 所示，该面板主要包括工作平面的转动设置和平动设置，在转动设置面板中输入 0，-90，0，在平动设置面板中输入 0，0，H1+H2/N，输入完毕，单击“OK”按钮。



a) b)

图 6-5 偏移工作平面设置面板

a) 转动工作平面设置面板 b) 平动工作平面设置面板

2）分割面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by WorkPlane，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

3）重复分割

对功能梯度材料涂层面需要进行多次分割，因此采用 APDL 的循环语句比较便捷，命令流如下。

```
*DO,I,1,N-2
wpoff,0,0,H2/N
ASBW,ALL
*ENDDO
```

（4）使用线分割面

1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出定义关键点面板，如图 6-4 所示，在该面板中输入关键点号（Keypoint number）为 50，然后继续输入在激活坐标系对应的坐标，X= L2+A、Y=0 和 Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 51 和对应的坐标 X= L2+A、Y= H1+H2 和 Z=0，单击“OK”按钮。

2）定义线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，用鼠标拾取关键点 50 和 51，单击“OK”按钮。

3）使用线分割面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Line，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，再选择刚创建的线 L12，单击“OK”按钮。

6. 划分网格

（1）设置裂纹尖端网格

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Ctrls→Concentrate KPs→Create，弹出拾取对话框拾取裂纹尖端处的关键点 7，单击“OK”按钮，弹出裂纹尖端网格控制面板，如图 6-6 所示，在面板中输入裂纹尖端第一圈单元的尺寸（Radius of 1st row of elems）为

A/20，围绕裂纹尖端第二圈单元尺寸与第一圈单元尺寸之比（Radius ratio（2nd row/1st））为 0.8，围绕裂纹尖端的单元数量（No of elems around circumf）为 10，为了模拟裂纹的应力奇异性，将 PLANE183 单元的中间节点偏移至单元边的 1/4 处 Skewed 1/4pt，单击“Apply”按钮；弹出拾取对话框，拾取关键点 9，单击“OK”按钮，裂纹尖端网格的设置参数同关键点 7 一样，设置完毕，单击“OK”按钮。

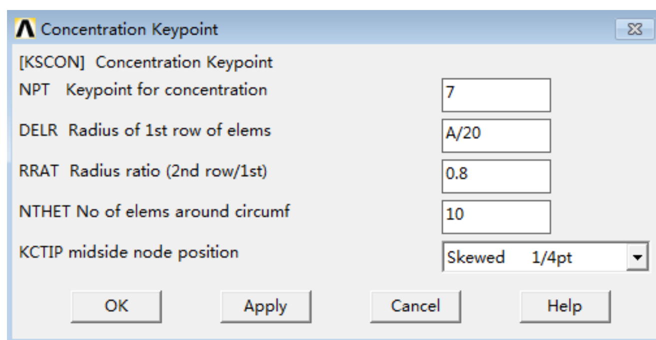


图 6-6 裂纹尖端网格控制面板

（2）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（3）设置总体网格尺寸

单击网格划分工具中尺寸控制区域（Size Controls）中的总体控制中设置（Set）按钮，弹出如图 6-7 所示的总体网尺寸设置面板，在单元尺寸中输入 L1/90，单击“OK”按钮。

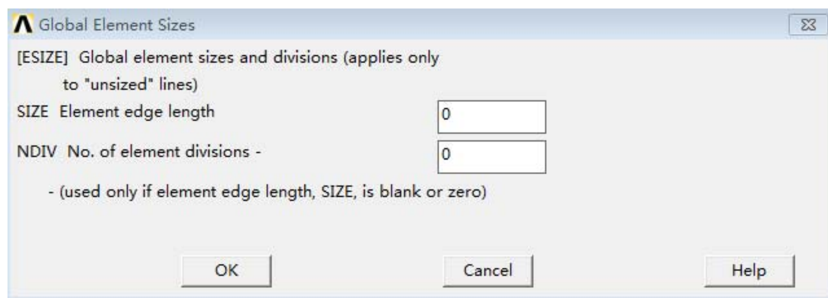


图 6-7 总体网格尺寸设置面板

（4）进行网格划分

因为模型中的需要划分的面较多，因此使用 APDL 语言中的循环语句划分网格比较方便，命令流如下。

```
MAT,1        !设置材料号为 1
ASEL,ALL !选择所有的面
ASEL,S,LOC,Y,0,H1    !选择 Y 方向 0 到 H1 范围内的面
AMESH,ALL !对选择的面进行网格划分
*DO,I,2,N+1
MAT,I !设置材料号为 I
```

```
ASEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,H1+H2/N*(I-2),H1+H2/N*(I-1)
AMESH,ALL
*ENDDO
```

6.6.2 静态断裂力学求解

1. 设置分析类型

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 6-8 所示，选择静力学求解（Static），单击“OK”按钮。

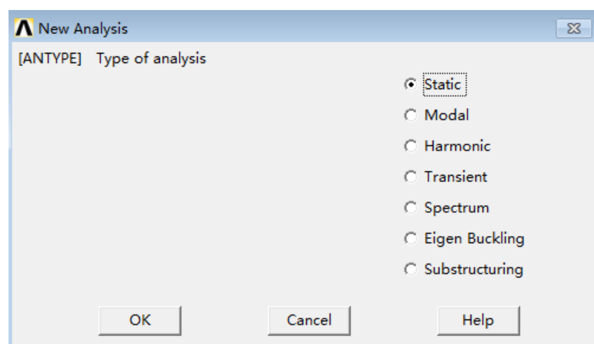


图 6-8 分析类型设置面板

2. 定义边界条件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出拾取对话框，用鼠标拾取线 L103 和 L99，单击“OK”按钮，弹出线的位移约束设置面板，如图 6-9 所示，选择被约束的自由度类型为 All DOF，单击“OK”按钮。

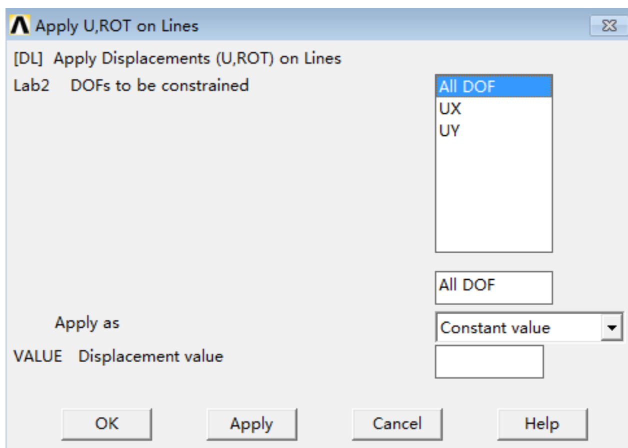


图 6-9 线的位移约束设置面板

3. 定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines，

弹出拾取对话框，用鼠标拾取线 L58 和 L13，单击“OK”按钮，弹出线上施加压力的设置面板，如图 6-10 所示，输入压力值（Load PRES value）为-10E6，单击“OK”按钮。

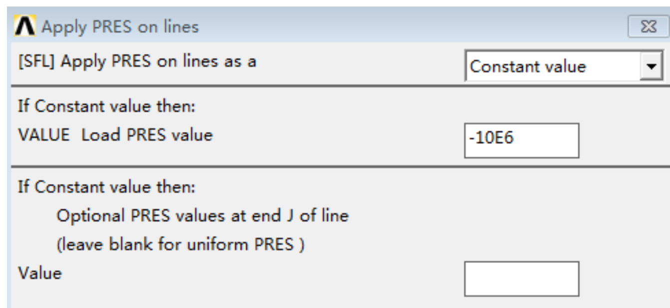


图 6-10　线上施加压力的设置面板

4. 设置断裂力学求解

（1）激活总体笛卡儿坐标系

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cartesian

（2）提取裂纹尖端 *A* 和 *B* 处的节点号

```
CNODEA =NODE(L2,H1,0)          !提取裂纹尖端 A 处的节点号并赋予 CNODEA
CNODEB =NODE(L2+2*A,H1,0)   ！提取裂纹尖端 B 处的节点号并赋予 CNODEB
```

（3）定义裂纹节点组件

1）选择裂纹尖端 *A* 处的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体对话框，如图 6-11 所示，单击“OK”按钮，弹出选择节点对话框，如图 6-12 所示，输入 CNODEA，单击“OK”按钮。



图 6-11　选择实体对话框

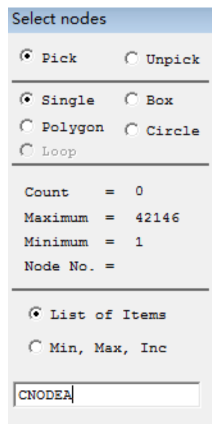


图 6-12　选择节点对话框

2）创建裂纹尖端 *A* 处的节点组件

GUI：单击 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component，弹出创建组件面板，如图 6-13 所示，输入组件名为 CKA，设置组件类型（Component is made of）为节点（Nodes），单击“OK”按钮。

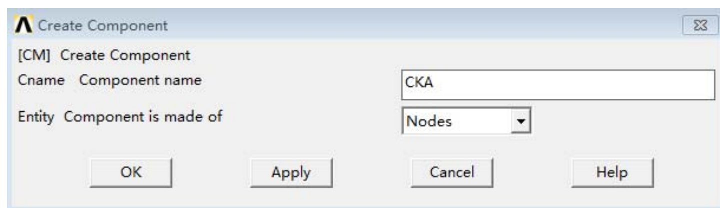


图 6-13 创建组件面板

3）选择裂纹尖端 *B* 处的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体对话框，如图 6-11 所示，单击“OK”按钮，弹出选择节点对话框，如图 6-12 所示，输入 CNODEB，单击“OK”按钮。

4）创建裂纹尖端 *A* 处的节点组件

GUI：单击 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component，弹出创建组件面板，如图 6-13 所示，输入组件名为 CKB，设置组件类型（Component is made of）为节点（Nodes），单击“OK”按钮。

5）选择所有单元

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

（4）创建裂纹尖端局部坐标系

1）创建裂纹尖端 *A* 处的裂纹尖端局部坐标系

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc，弹出拾取对话框，如图 6-14 所示，输入 L2,H1,0，单击“OK”按钮。

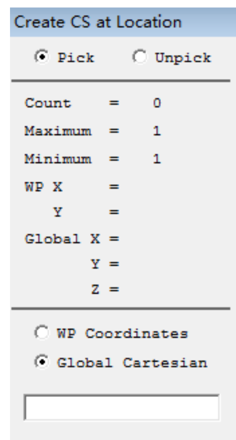


图 6-14 在指定位置创建局部坐标系的拾取对话框

弹出图 6-15 所示在指定位置创建局部坐标系设置面板，输入新的坐标系参考号（Ref number of new coord sys）为 11；坐标系类型为笛卡儿坐标系（Cartesian 0）；坐标系的原点坐标为 0.06、0.15 和 0；绕 z 轴的转动角度为 180°，单击“OK”按钮。

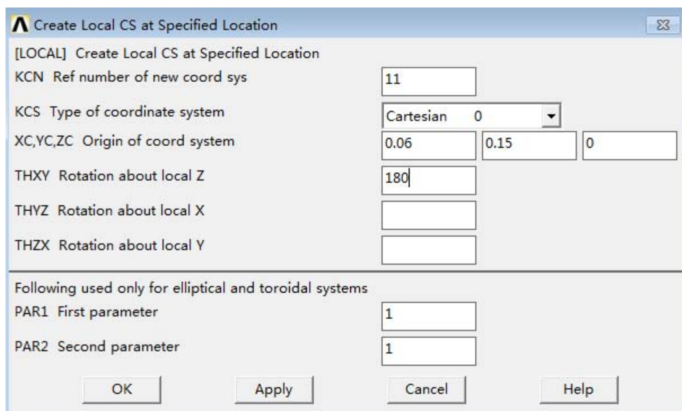


图 6-15 在指定位置创建局部坐标系设置面板

2）创建裂纹尖端 *B* 处的裂纹尖端局部坐标系

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At

Specified Loc，弹出拾取对话框，如图 6-14 所示，输入 L2+2*A,H1,0，单击“OK”按钮。弹出图 6-15 所示在指定位置创建局部坐标系设置面板，输入新的坐标系参考号（Ref number of new coord sys）为 12；坐标系类型为笛卡儿坐标系（Cartesian 0）；坐标系的原点坐标为 L2+2*A、H1 和 0，其他保持默认值，单击“OK”按钮。

（5）使用相互作用积分法计算断裂力学参数

ANSYS14 对于相互作用积分法暂不支持 GUI 操作，因此只能使用命令流，其命令流如下。

```
CINT,NEW,1
CINT,TYPE,SIFS          !声明计算的断裂参数为应力强度因子
CINT,CTNC,CKA           !定义裂纹尖端组件信息
CINT,NCON,5             !定义绕线计算条数
CINT,SYMM,OFF           !声明为非对称裂纹
CINT,NORM,11,2          !声明裂纹面法向

CINT,NEW,2
CINT,TYPE,SIFS
CINT,CTNC,CKB
CINT,NCON,5
CINT,SYMM,OFF
CINT,NORM,12,2
```

5. 求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出求解提示对话框，单击“OK”按钮。

6.6.3 静态求解后处理

1. 查看位移云图

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出观察节点结果设置面板，如图 6-16 所示，选择自由度求解结果（DOF Solution）中的位移云图（Displacement vector sum），单击“OK”按钮，弹出基体-涂层的整体位移云图，如图 6-17 所示，通过放大操作可以观察到基体-涂层裂纹处的位移云图，如图 6-18 所示。

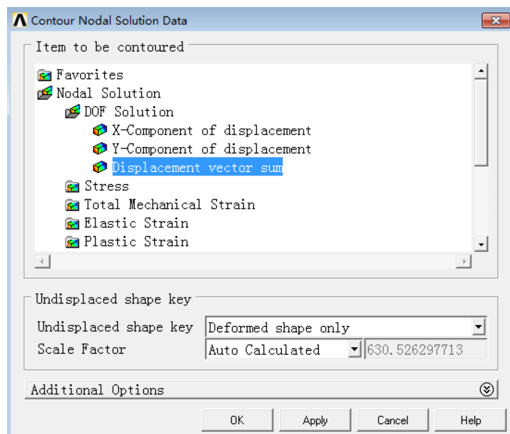


图 6-16　观察节点结果设置面板

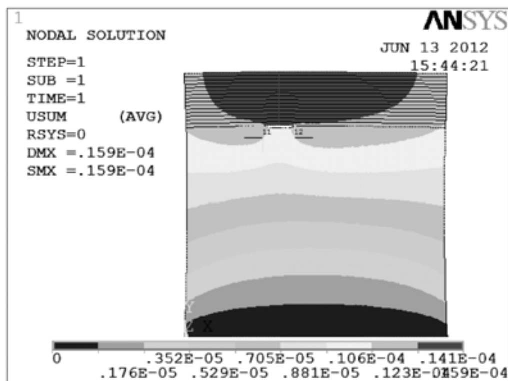


图 6-17 基体-涂层的整体位移云图

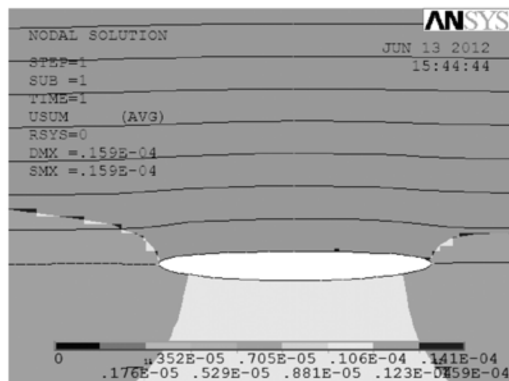


图 6-18 基体-涂层裂纹处的位移云图

2. 查看等效应力云图

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出观察节点结果设置面板，如图 6-16 所示，选择 Nodal Solution→Stress→von Mises stress，单击“OK”按钮，弹出基体-涂层的整体等效应力云图，如图 6-19 所示，通过放大操作可以观察到基体-涂层裂纹处的等效应力云图，如图 6-20 所示。

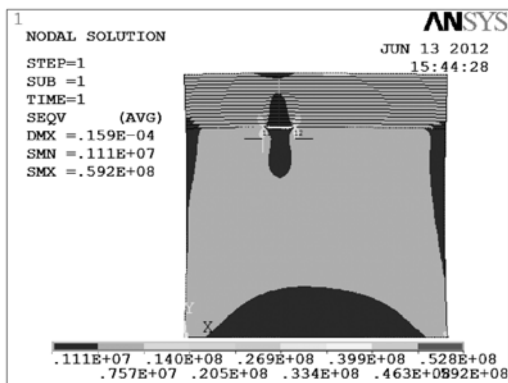


图 6-19 基体-涂层的整体等效应力云图

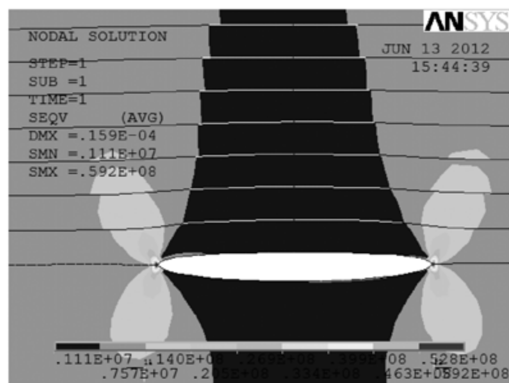


图 6-20 基体-涂层裂纹处的等效应力云图

3. 查看应力强度因子

观察相互作用积分法求解的应力强度因子，只能通过以下命令实现。

```
PRCINT,1,,K1        ! 裂纹尖端 A 点输出 I 型应力强度因子
PRCINT,1,,K2        ! 裂纹尖端 A 点输出 II 型应力强度因子
PRCINT,2,,K1        ! 裂纹尖端 B 点输出 I 型应力强度因子
PRCINT,2,,K2        ! 裂纹尖端 B 点输出 II 型应力强度因子
```

弹出图 6-21～6-24 所示 *A* 点和 *B* 点处的 I 型与 II 型应力强度因子。由图 6-21～6-24 可知，相互作用法对于 *A* 点和 *B* 点处的 I 型应力强度因子计算的收敛性非常有效，在取值时一般取第二和第三个平均值即可，对于 II 型裂纹，如果计算出现负值只表示方向问题，与计算的数值没有关系。

```
***** POST1 K1          RESULT LISTING *****

 CrackID =   1
  Crack Front Node =15453
   Contour Values =   0.18973E+07  0.18939E+07  0.18943E+07  0.18948E+07
   Contour Values =   0.18977E+07
```

图 6-21　裂纹尖端 *A* 点处的 I 型应力强因子

```
***** POST1 K2          RESULT LISTING *****

 CrackID =   1
  Crack Front Node =15453
   Contour Values =  -0.18929E+06 -0.17926E+06 -0.17538E+06 -0.17244E+06
   Contour Values =  -0.17181E+06
```

图 6-22　裂纹尖端 *A* 点处的 II 型应力强因子

```
***** POST1 K1          RESULT LISTING *****

 CrackID =   2
  Crack Front Node =  254
   Contour Values =   0.19194E+07  0.19152E+07  0.19155E+07  0.19154E+07
   Contour Values =   0.19183E+07
```

图 6-23　裂纹尖端 *B* 点处的 I 型应力强因子

```
***** POST1 K2          RESULT LISTING *****

 CrackID =   2
  Crack Front Node =  254
   Contour Values =   59509.       49655.       45670.       42766.
   Contour Values =   42435.
```

图 6-24　裂纹尖端 *B* 点处的 II 型应力强因子

4. 使用位移法计算应力强度因子

（1）设置结果坐标系

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Options for Outp，弹出输出选项设置面板，如图 6-25 所示，设置结果坐标系（Results coord system）为局部坐标系（Local system），局部坐标参考系的参考号为 11，单击“OK”按钮。

（2）选择裂纹尖端区域的节点

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Nodes，弹出拾取对话框，用鼠标按顺序拾取如图 6-26 所示的 15453、24741、24743、15455 和 15471 节点，单击“OK”按钮，弹出路径设置面板，如图 6-27 所示，输入路径名为 CA，单击“OK”按钮。

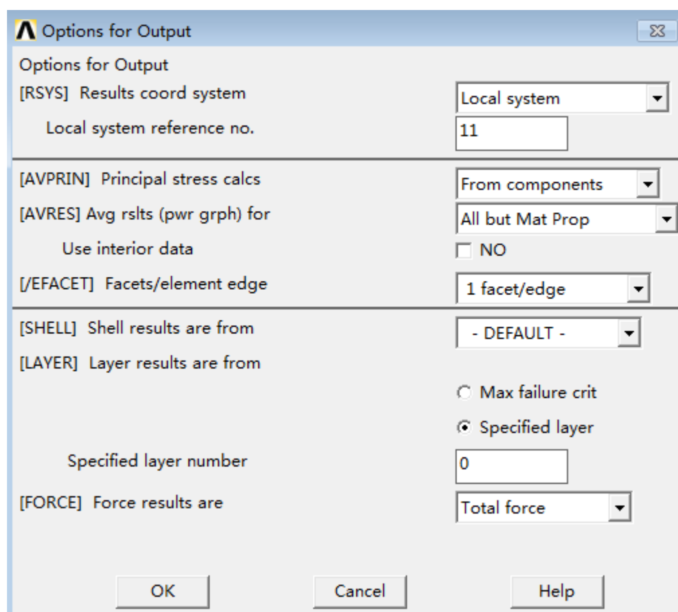


图 6-25　输出选项设置面板

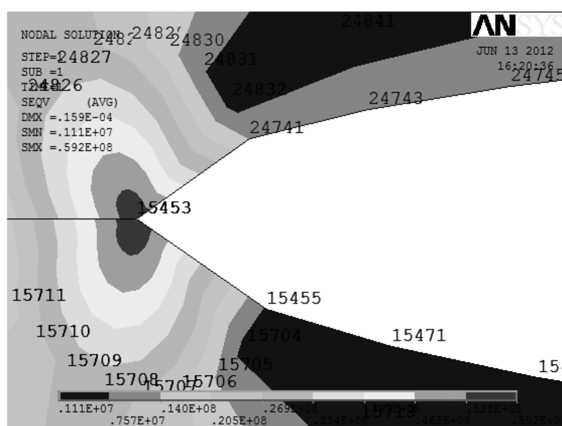


图 6-26　裂纹尖端处的节点号

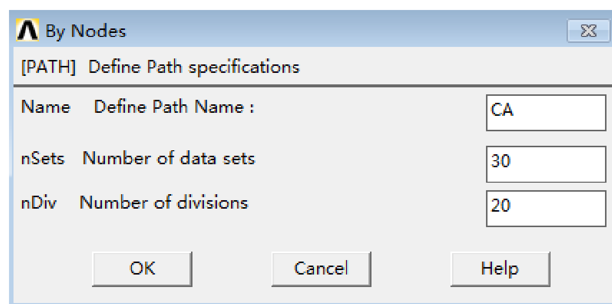


图 6-27　路径设置面板

（3）计算应力强度因子

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Nodal Calcs→Stress Int Factr，弹出应力强度因子计算设置面板，如图 6-28 所示，设置基于平面应变计算位移（Disp extrapolate based on）为 Plane strain；设置裂纹面处的材料号为 1，模型类型（Model type）为完全裂纹模型（Full-crack model），其他保持默认，单击“OK”按钮，弹出位移法计算的 *A* 点处的应力强度因子，如图 6-29 所示，由图 6-29 可知 *A* 点处的 I 型应力强度因子为 0.18223E+07Pa$\sqrt{m}$，II 型应力强度因子为 0.19414E+06 Pa$\sqrt{m}$，由此可知使用位移法计算的应力强度因子与相互作用积分法计算得出的结果相比，位移法的 I 型应力强度因子要小于相互作用积分得到的结果，而位移法的 II 型应力强度因子要大于相互作用积分得到的结果。建议使用相互作用积分法，因为该方法在同等网格数量下比位移法更加精确，并且在计算动态应力强度因子时有着很大的计算优势。

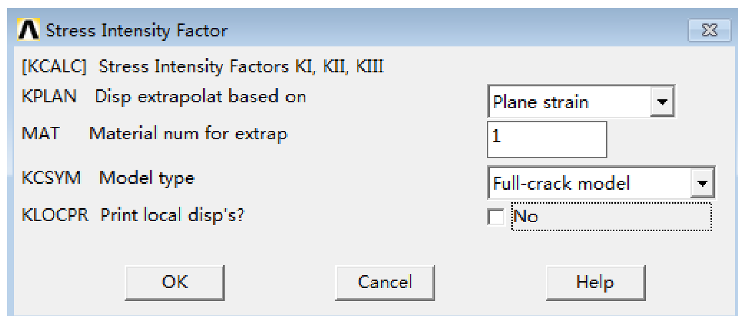


图 6-28　应力强度因子计算设置面板

```
**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY  FACTORS  ****

  ASSUME PLANE STRAIN CONDITIONS

  ASSUME A FULL-CRACK MODEL (USE 5 NODES)

  EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:    15453    24741    24743    15455    15471
   WITH NODE    15453 AS THE CRACK-TIP NODE

  USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER     1
   EX =    0.10000E+12    NUXY =    0.30000      AT TEMP =   0.0000

**** KI =  0.18223E+07,   KII =  0.19414E+06,   KIII =   0.0000      ****
```

图 6-29　位移法计算的 *A* 点处的应力强度因子

6.6.4　动态断裂力学求解

1. 设置分析类型

激活动力学求解如下。

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 6-30 所示，选择瞬态动力学求解（Transient），单击“OK”按钮，弹出瞬态动力学

求解方法设置面板，在该面板中选择求解方法（Solution method）为完全法（Full），质量矩阵使用一致质量矩阵，因此保持默认设置，单击“OK”按钮，如图 6-31 所示。

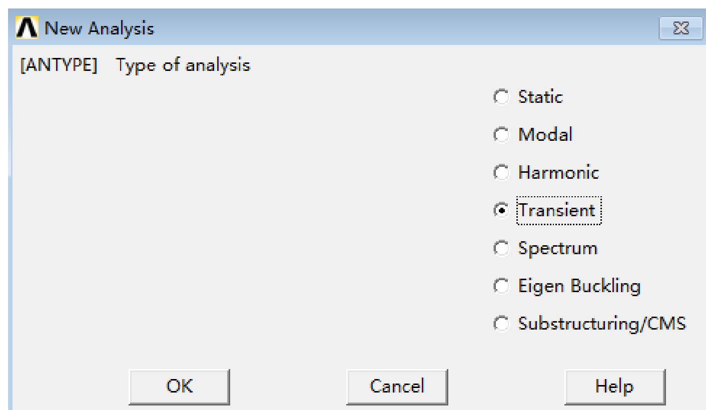


图 6-30 分析类型设置面板

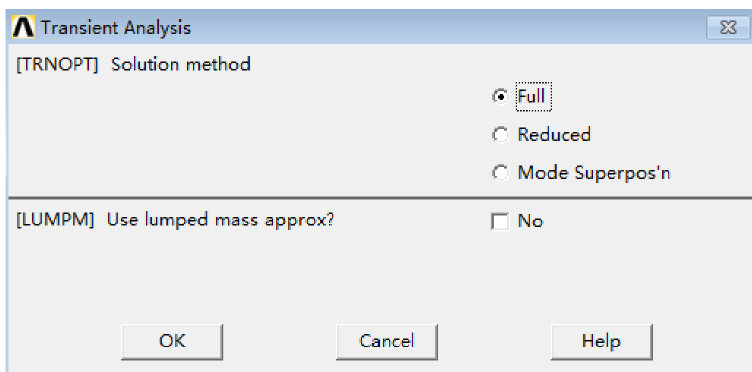


图 6-31 瞬态动力学求解方法设置面板

2. 定义边界条件

断裂力学的瞬态分析的边界条件与静态分析时的一致，参见静态断裂力学求解中的边界条件设置方法。

3. 定义载荷

（1）定义阶跃函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Functions→Refine/Edit，弹出函数编辑器设置面板，如图 6-32 所示，设置该函数为多变量函数（Multivalued function based on regime variable），变量名为 T，变量名对应的变量为时间（TIME），单击函数编辑器上变量区域 1（Regime1），弹出变量的第一个变化区间及函数值设置面板，如图 6-33 所示，设置 T 的变化范围为 0～0.00005，对应的函数值为-10E6，单击函数编辑器上变量区域 2（Regime2），弹出变量的第二个变化区间及函数值设置面板，如图 6-34 所示，设置 T 的变化范围为 0.00005～0.0005，对应的函数值为 0，选择函数编辑器中 File→Save，弹出保存函数文件对话框，输入函数名为 FC，然后保存文件，选择函数编辑器中 File→Close，关闭函数编辑器。

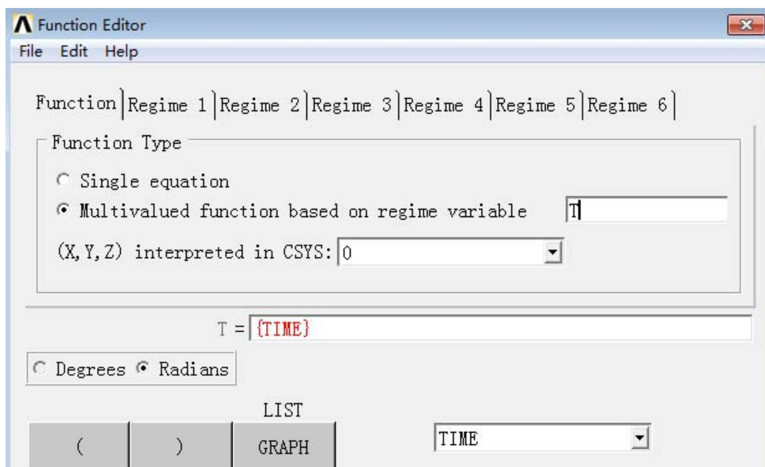


图 6-32　函数编辑器设置面板

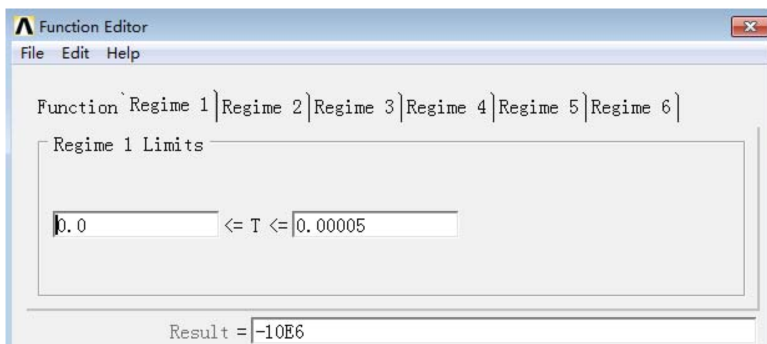


图 6-33　设置变量的第一个变化区间及函数值

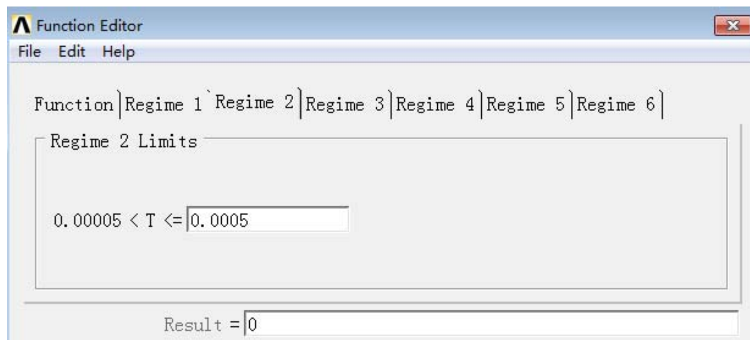


图 6-34　设置变量的第二个变化区间及函数值

（2）读入函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Functions→Read File，弹出读入函数文件对话框，选择刚保存的 FC 文件，单击“打开”按钮，弹出函数加载器设置面板，如图 6-35 所示，输入表格参数名（Table parameter name）为 FT，输入完毕，单击“OK”按钮。

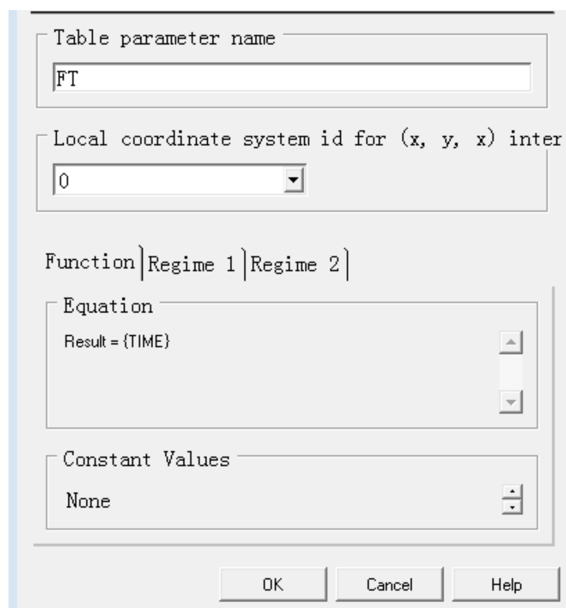


图 6-35　函数加载器设置面板

（3）施加表载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines，弹出拾取对话框，用鼠标拾取线 L58 和 L13，单击“OK”按钮，弹出线上施加压力的设置面板，如图 6-10 所示，设置压力加载方式为存在的表格（Existing table），单击“OK”按钮，弹出施加表载荷设置面板，如图 6-36 所示，选择 FT，单击“OK”按钮。

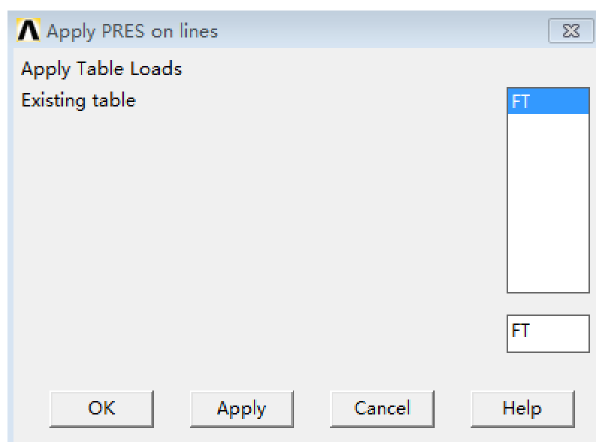


图 6-36　施加表载荷设置面板

4. 定义载荷步

（1）定义输出控制

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出输出控制设置面板，如图 6-37 所示，设置输入每一个子步（Every substep），单击“OK”按钮。



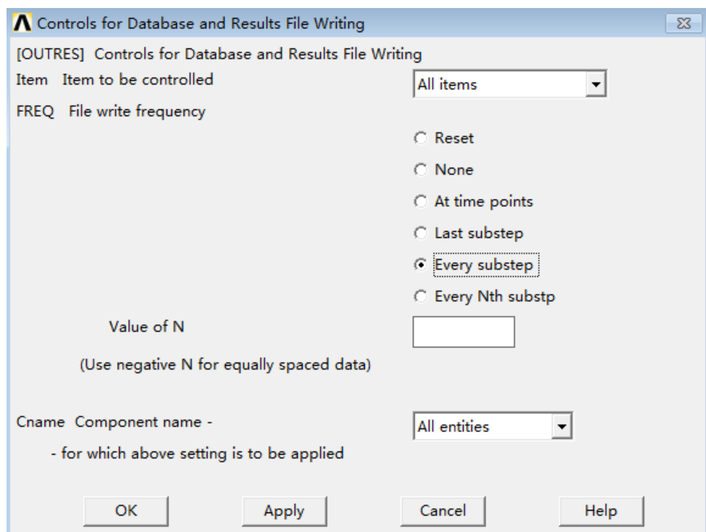


图 6-37　输出控制设置面板

（2）设置阻尼

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Damping，弹出阻尼设置面板，如图 6-38 所示，输入质量阻尼系数（Mass matrix multiplier）为 0.000002 和刚度阻尼系数（Stif. matrix multiplier）为 0.00001，单击“OK”按钮。

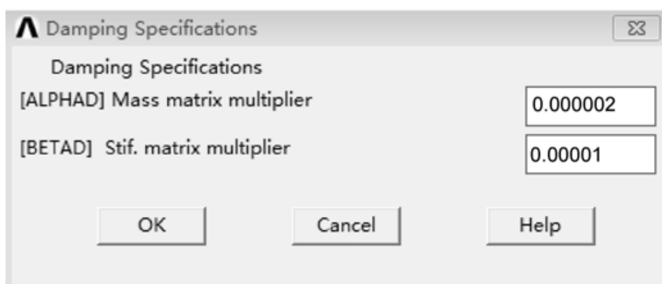


图 6-38　阻尼设置面板

5. 设置断裂力学求解

该步骤可参考本章静态断裂力学求解中的“设置断裂力学求解”中的（1）～（4）。

6. 求解

（1）定义四个数组

为了存储动态应力强度因子需定义四个数组，定义方法如下。

GUI：单击 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit，弹出数组参数面板，如图 6-39 所示，单击“Add”按钮，弹出新数组参数设置面板，如图 6-40 所示，输入数组参数名（Parameter name）为 KAI，参数类型（Parameter type）为数组（Array），数组维数为 500、1、1，单击“Apply”按钮；继续输入数组参数名为 KAII，单击“Apply”按钮；继续输入数组参数名为 KBI，单击“Apply”按钮；继续输入数组参数名为 KBII，单击“OK”按钮。

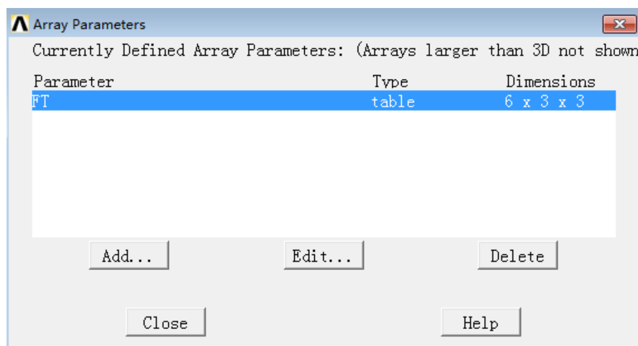


图 6-39　数组参数面板

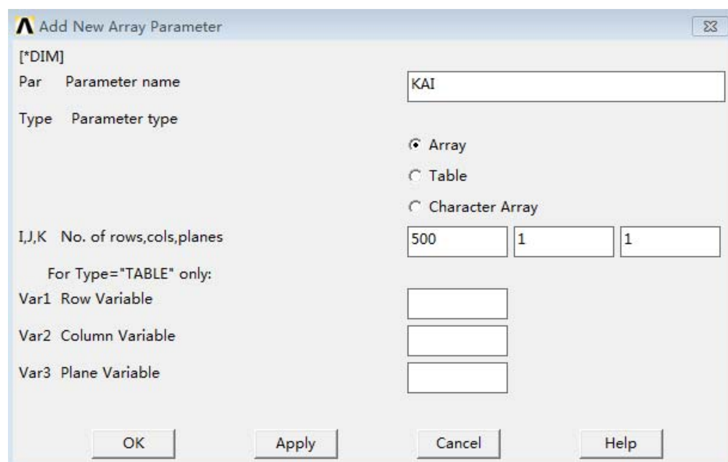


图 6-40　新数组参数设置面板

（2）设置求解时间

对于动态断裂力学问题，采用位移法计算应力强度因子非常繁琐，而且不能在 ANSYS 中直接实现。而相互作用积分法则可以很好地解决这一问题，下面给出了具体的命令流。

```
I=1
*DO,T,1e-6,1e-6*500,1e-6          !设置计算时间范围从 1e-6s 到 5e-4s，计算间隔为 1e-6s
TIME,T
AUTOTS,1
NSUBST,1,1,1,1
KBC,1
SOLVE
SAVE
*GET,K1,CINT,1,CTIP,CNODEA,,3,DTYPE,K1        !提取 A 点出的 I 型应力强度因子
*GET,K2,CINT,1,CTIP,CNODEA,,3,DTYPE,K2        !提取 A 点出的 II 型应力强度因子
KAI(I,1)=K1/10E6/SQRT(3.1415*0.012)           !对 A 点 I 型应力强度因子归一化
KAII(I,1)=K2/10E6/SQRT(3.1415*0.012)          !对 A 点 II 型应力强度因子归一化
*GET,K1,CINT,2,CTIP,CNODEB,,3,DTYPE,K1        !提取 B 点出的 I 型应力强度因子
*GET,K2,CINT,2,CTIP,CNODEB,,3,DTYPE,K2        !提取 B 点出的 II 型应力强度因子
```

```
KBI(I,1)=K1/10E6/SQRT(3.1415*0.012)          !对B点I型应力强度因子归一化
KBII(I,1)=K2/10E6/SQRT(3.1415*0.012)         !对B点II型应力强度因子归一化
I=I+1
*ENDDO
7.输出动态应力强度因子
*CREATE,TEMPLE,MAC
*CFOPEN,KAI,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KAI(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*CFOPEN,KAII,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KAII(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*CFOPEN,KBI,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KBI(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*CFOPEN,KBII,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KBII(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*END

temple
```

6.6.5 动态求解后处理

1. 查看不同时刻的等效应力

（1）读入 1E-6s 时刻的结果

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Read Results→By Pick，弹出计算结果列表，选择 1E-6，单击“Read”按钮，然后单击“Close”按钮。

（2）观察 1E-6s 时刻的等效应力

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出观察节点结果设置面板，选择 Nodal Solution→Stress→von Mises stress，单击“OK”按钮，弹出基体-涂层的整体等效应力云图，如图 6-41 所示。同理可以查看 1E-5s，5E-5s 和 8E-5s 时刻的等效应力云图，如图 6-42～图 6-44 所示。

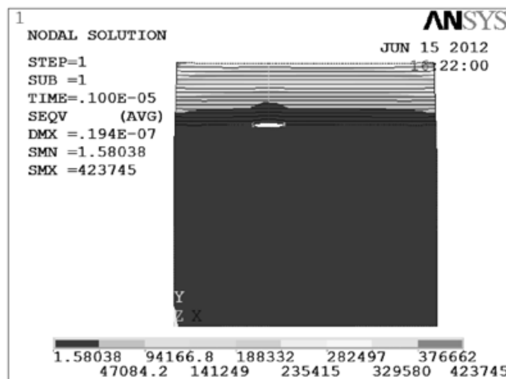


图 6-41 1E-6s 时刻的等效应力云图

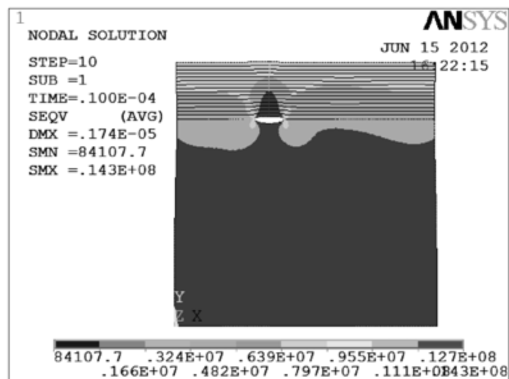


图 6-42 1E-5s 时刻的等效应力云图

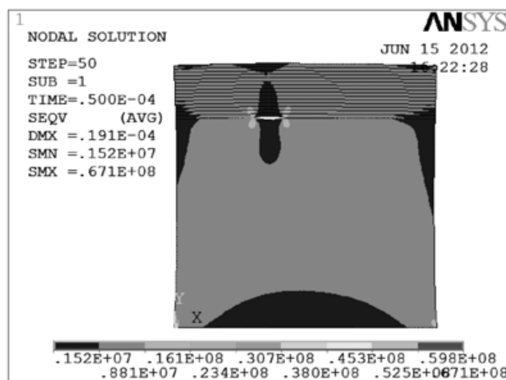


图 6-43 5E-5s 时刻的等效应力云图

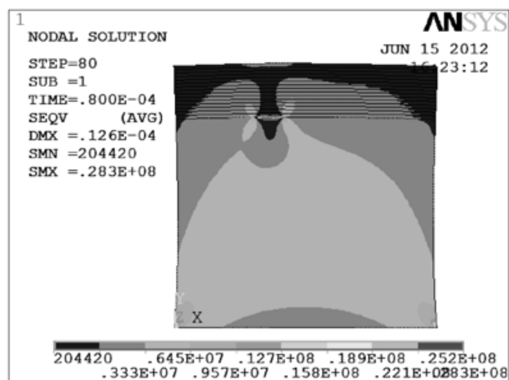
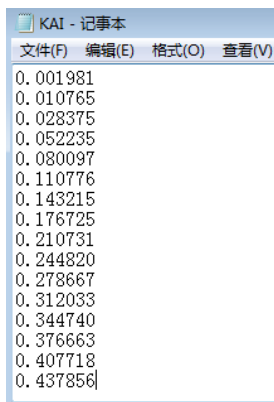


图 6-44 8E-5s 时刻的等效应力云图

2. 查看不同时刻的应力强度因子

用户打开 ANSYS 的工作目录就可以看到输出四个文本文件里面分别存储着 *A* 点和 *B* 点的应力强度因子，如图 6-45～图 6-48 分别给出了 *A* 点、*B* 点的 I 型和 II 型应力强度因子。用户可以将数据复制到画图软件中，进行图形处理。

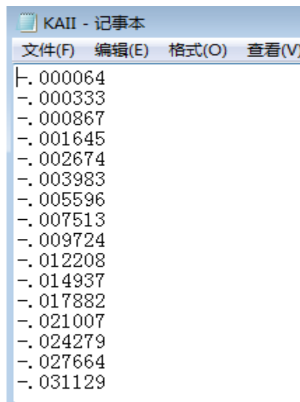


KAI - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V)

0.001981
0.010765
0.028375
0.052235
0.080097
0.110776
0.143215
0.176725
0.210731
0.244820
0.278667
0.312033
0.344740
0.376663
0.407718
0.437856

图 6-45 *A* 点 I 型应力强度因子与时间关系



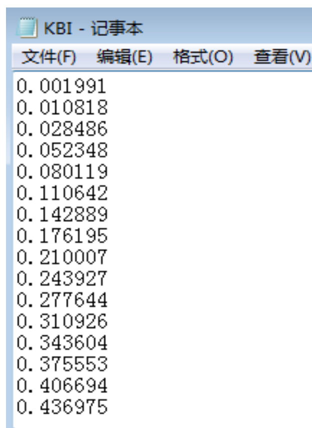
KAII - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V)

-.000064
-.000333
-.000867
-.001645
-.002674
-.003983
-.005596
-.007513
-.009724
-.012208
-.014937
-.017882
-.021007
-.024279
-.027664
-.031129

图 6-46 *A* 点 II 型应力强度因子与时间关系



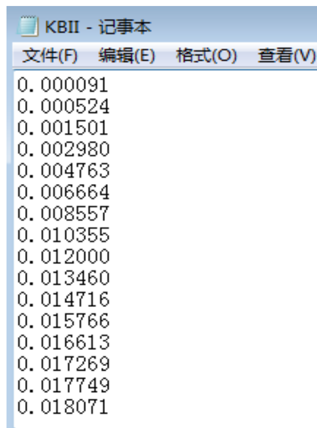


KBI - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V)

0.001991
0.010818
0.028486
0.052348
0.080119
0.110642
0.142889
0.176195
0.210007
0.243927
0.277644
0.310926
0.343604
0.375553
0.406694
0.436975

图 6-47 *B* 点 I 型应力强度因子与时间关系



KBII - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V)

0.000091
0.000524
0.001501
0.002980
0.004763
0.006664
0.008557
0.010355
0.012000
0.013460
0.014716
0.015766
0.016613
0.017269
0.017749
0.018071

图 6-48 *B* 点 II 型应力强度因子与时间关系

3. 查看不同位置的等效应力

图 6-49 和图 6-50 给出了 463 节点和 531 节点处的等效应力与时间的关系，具体查看方法可参考本章的视频教程。

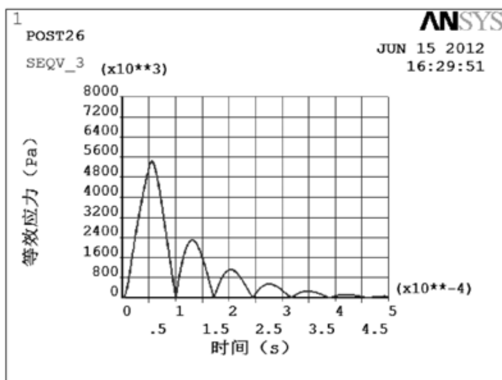


图 6-49 463 节点处等效应力与时间关系

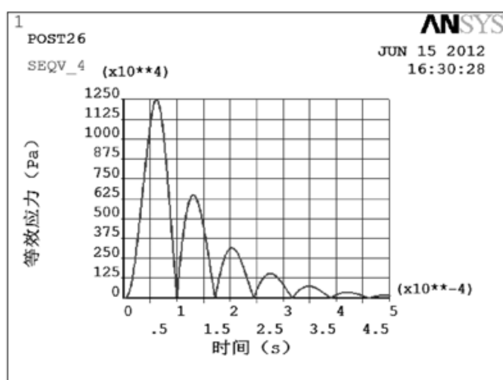


图 6-50 531 节点处等效应力与时间关系

6.7 命令流

6.7.1 静态分析命令流

```
/FILNAME,Metal Forming,0          !定义文件名
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
L1=0.2
L2=0.06
H1=0.15
```



```
H2=0.04
A=0.012
E1=1E11
E3=10E11
V=0.3
ROU1=3000
ROU3=8000
BEITAE=1/H2*LOG(E3/E1)
BEITAROU=1/H2*LOG(ROU3/ROU1)
N=15
ET,1,PLANE183              !定义二维 8 节点高阶单元
KEYOPT,1,3,2               !设置单元为平面应变单元

MP,EX,1,E1                 !定义弹性模量
MP,PRXY,1,V                !定义泊松比
MP,DENS,1,ROU1             !定义密度
!使用循环语句定义功能梯度各层中的材料参数
J=2
*DO,I,1,2*N-1,2
MP,EX,J,E1*EXP(BEITAE*(H2/2/N*I))
MP,PRXY,J,V
MP,DENS,J,ROU1*EXP(BEITAROU*(H2/2/N*I))
J=J+1
*ENDDO
!定义关键点
K,1,0,0,0
K,2,L1,0,0
K,3,L1,H1,0
K,4,L1,H1+H2,0
K,5,0,H1+H2,0
K,6,0,H1,0
K,7,L2,H1,0
K,8,L2+A,H1,0
K,9,L2+2*A,H1,0
!通过关键点定义面
A,1,2,3,9,7,6
A,5,6,7,8,9,3,4
WPRO,,-90.000000,          !转动工作平面
WPOFF,0,0,H1+H2/N          !平移工作平面
ASBW,ALL                   !使用工作平面切分所有的面
!使用循环语句依次切分面，建立功能梯度分层结构
*DO,I,1,N-2
wpoff,0,0,H2/N
ASBW,ALL
*ENDDO
!定义关键点
```

```
K,500,L2+A,0,0
K,501,L2+A,H1+H2,0
L,500,501
!运算布尔减法
ASBL,ALL,12
!设置裂纹尖端网格尺寸
KSCON,7,A/20,0.8,10,1,
KSCON,9,A/20,0.8,10,1,
ESIZE,L1/90 !定义总体网格尺寸
MAT,1                    !设置网格的材料号
ASEL,ALL                 !选择所有的面
ASEL,S,LOC,Y,0,H1        !选择 Y 方向坐标大于或等于 0 且小于或等于 H1 的所有面
AMESH,ALL                !划分选择面的网格
!使用循环语句划分其他面
*DO,I,2,N+1
MAT,I
ASEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,H1+H2/N*(I-2),H1+H2/N*(I-1)
AMESH,ALL
*ENDDO
!进入求解器
/SOL
ANTYPE,0!激活静态分析
!定义边界条件
DL,99, ,ALL,
DL,103, ,ALL,
!定义载荷
SFL,58,PRES,-10E6,
SFL,13,PRES,-10E6,
CSYS,0   !激活总体笛卡尔坐标系
CNODEA=NODE(L2,H1,0)                  !获取裂纹尖端 A 的节点号
CNODEB=NODE(L2+2*A,H1,0)              !获取裂纹尖端 B 的节点号
NSEL,S, , ,CNODEA                     !选择节点号为 CNODEA 的节点
CM,CKA,NODE                           !定义节点组件 CKA

NSEL,S, , ,CNODEB                     !选择节点号为 CNODEB 的节点
CM,CKB,NODE                           !定义节点组件 CKB
ALLSEL,ALL                            !选择所有实体

LOCAL,11,0,L2,H1,0,180, , ,1,1,       !定义局部坐标系 11
LOCAL,12,0,L2+2*A,H1,0,0, , ,1,1,     !定义局部坐标系 12
!设置断裂分析计算条件
CINT,NEW,1               !为断裂分析分配一个识别号为 1
CINT,TYPE,SIFS           !声明计算的断裂参数为应力强度因子
CINT,CTNC,CKA            !定义裂纹尖端 A 的信息
CINT,NCON,5              !设置计算的绕线条数为 5
```

```
CINT,SYMM,OFF           !声明为非对称型裂纹
CINT,NORM,11,2          !定义裂纹面的法向为局部坐标系 11 的 Y 轴
CINT,NEW,2              !为断裂分析分配一个识别号为 1
CINT,TYPE,SIFS          !声明计算的断裂参数为应力强度因子
CINT,CTNC,CKB           !定义裂纹尖端 B 的信息
CINT,NCON,5             !设置计算的绕线条数为 5
CINT,SYMM,OFF           !声明为非对称型裂纹
CINT,NORM,12,2          !定义裂纹面的法向为局部坐标系 12 的 Y 轴
SOLVE                   !开始求解
/POST1
PRCINT,1,,K1            ! 输出裂纹尖端 A 的 I 型应力强度因子
PRCINT,1,,K2            ! 输出裂纹尖端 A 的 II 型应力强度因子
PRCINT,2,,K1            ! 输出裂纹尖端 B 的 I 型应力强度因子
PRCINT,2,,K2            ! 输出裂纹尖端 B 的 II 型应力强度因子
```

6.7.2 动态分析命令流

```
/FILNAME,Metal Forming,0          !定义文件名
!前处理的注释，用户参见本章的静态分析命令流
/PREP7
L1=0.2
L2=0.06
H1=0.15
H2=0.04
A=0.012
E1=1E11
E3=10E11
V=0.3
ROU1=3000
ROU3=8000
BEITAE=1/H2*LOG(E3/E1)
BEITAROU=1/H2*LOG(ROU3/ROU1)
N=15
ET,1,PLANE183
!*
KEYOPT,1,3,2

MP,EX,1,E1
MP,PRXY,1,V
MP,DENS,1,ROU1
J=2
*DO,I,1,2*N-1,2
MP,EX,J,E1*EXP(BEITAE*(H2/2/N*I))
MP,PRXY,J,V
MP,DENS,J,ROU1*EXP(BEITAROU*(H2/2/N*I))
J=J+1
```

```
*ENDDO

K,1,0,0,0
K,2,L1,0,0
K,3,L1,H1,0
K,4,L1,H1+H2,0
K,5,0,H1+H2,0
K,6,0,H1,0
K,7,L2,H1,0
K,8,L2+A,H1,0
K,9,L2+2*A,H1,0
A,1,2,3,9,7,6
A,5,6,7,8,9,3,4
WPRO,,-90.000000,
WPOFF,0,0,H1+H2/N
ASBW,ALL
*DO,I,1,N-2
WPOFF,0,0,H2/N
ASBW,ALL
*ENDDO
K,500,L2+A,0,0
K,501,L2+A,H1+H2,0
L,500,501
ASBL,ALL,12
KSCON,7,A/20,0.8,10,1,
KSCON,9,A/20,0.8,10,1,
!MSHAPE,1,2D
ESIZE,L1/90
MAT,1
ASEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0,H1
AMESH,ALL
*DO,I,2,N+1
MAT,I
ASEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,H1+H2/N*(I-2),H1+H2/N*(I-1)
AMESH,ALL
*ENDDO
!进入求解器
/SOL
ANTYPE,4    !激活瞬态动力学分析
!定义边界条件
DL,99, ,ALL,
DL,103, ,ALL,
!定义函数
*DEL,_FNCNAME
```



```
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'FT'
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,RR.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,3,3,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: {TIME}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, 99, 0, 1, 1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
! END OF EQUATION: {TIME}
!
! BEGIN OF EQUATION: -10E6
*SET,%_FNCNAME%(0,0,2), 0.00005, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,2), 1.0, 99, 0, -10E6, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,2),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,2),     0
! END OF EQUATION: -10E6
!
! BEGIN OF EQUATION: 0
*SET,%_FNCNAME%(0,0,3), 0.005, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,3), 1.0, 99, 0, 0, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,3),     0
! END OF EQUATION: 0
!-->
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,13
FITEM,2,58
```

```
/GO
!使用函数加载，定义载荷
SFL,P51X,PRES, %FT%
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL,         !设置输出所有子步
ALPHAD,0.000002,        !定义质量阻尼系数
BETAD,0.00001,          !定义刚度阻尼系数

CSYS,0   !激活总体笛卡儿坐标系
CNODEA=NODE(L2,H1,0)          !获取裂纹尖端 A 的节点号
CNODEB=NODE(L2+2*A,H1,0)  !获取裂纹尖端 B 的节点号
NSEL,S, , ,CNODEA
CM,CKA,NODE

NSEL,S, , ,CNODEB
CM,CKB,NODE
ALLSEL,ALL

LOCAL,11,0,L2,H1,0,180, , ,1,1,
LOCAL,12,0,L2+2*A,H1,0,0, , ,1,1,

CINT,NEW,1
CINT,TYPE,SIFS
CINT,CTNC,CKA
CINT,NCON,5
CINT,SYMM,OFF
CINT,NORM,11,2

CINT,NEW,2
CINT,TYPE,SIFS
CINT,CTNC,CKB
CINT,NCON,5
CINT,SYMM,OFF
CINT,NORM,12,2

*DIM,KAI,ARRAY,500,1,1, , ,      !定义数组 KAI 用于存储 A 点的 I 型应力强度因子
*DIM,KAII,ARRAY,500,1,1, , ,     !定义数组 KAII 用于存储 A 点的 II 型应力强度因子
*DIM,KBI,ARRAY,500,1,1, , ,      !定义数组 KBI 用于存储 B 点的 I 型应力强度因子
*DIM,KBII,ARRAY,500,1,1, , ,     !定义数组 KBII 用于存储 B 点的 II 型应力强度因子

I=1
*DO,T,1E-6,1E-6*500,1E-6
TIME,T
AUTOTS,1
NSUBST,1,1,1,1
KBC,1
```



```
SOLVE
SAVE
*GET,K1,CINT,1,CTIP,CNODEA,,3,DTYPE,K1
*GET,K2,CINT,1,CTIP,CNODEA,,3,DTYPE,K2
KAI(I,1)=K1/10E6/SQRT(3.1415*0.012)
KAII(I,1)=K2/10E6/SQRT(3.1415*0.012)

*GET,K1,CINT,2,CTIP,CNODEB,,3,DTYPE,K1
*GET,K2,CINT,2,CTIP,CNODEB,,3,DTYPE,K2
KBI(I,1)=K1/10E6/SQRT(3.1415*0.012)
KBII(I,1)=K2/10E6/SQRT(3.1415*0.012)
I=I+1
*ENDDO
!定义宏文件，用于将存储的应力强度因子输出到工作目录中的 KAI，KAII ，KBI 和 KBII
*CREATE,TEMPLE,MAC
*CFOPEN,KAI,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KAI(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*CFOPEN,KAII,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KAII(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*CFOPEN,KBI,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KBI(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*CFOPEN,KBII,TXT
*DO,I,1,1
*VWRITE,KBII(I,1)
(F8.6)
*ENDDO

*END
TEMPLE   !运行宏文件
```

第 7 章　变厚度圆盘的有限元分析

7.1　引言

旋转圆盘是汽轮机、离心式压缩机、航空发动机涡轮盘等的重要部件之一，由于这些机械以每分钟几千转至几万转做高速旋转，为减小旋转惯性，常将旋转圆盘设计成各种变厚度形状，而变厚度圆盘对于工程设计更具有一般性，因此变厚度圆盘的强度问题备受关注。旋转圆盘中的应力与位移分析对圆盘的强度设计及结构优化有重要的实际意义。

关于旋转圆盘的应力分析与位移计算问题，国内外众多学者进行了研究，现有文献主要采用解析法或半解析法求解变厚度圆盘问题。解析法主要基于线弹性理论求解；半解析法主要采用传递矩阵法，即利用已有的简单盘的应力计算系数和边界条件，建立待定常数的传递矩阵，求得应力与位移。此方法适用于任意轮廓的变厚度圆盘，但以上两种方法主要集中在弹性范围内，这与工程实际不能完全符合，因为当变厚度圆盘的转速高到一定程度时，肯定会出现塑性变形，因此对变厚度圆盘进行弹塑性分析更符合工程实际。

本章实例利用变厚度壳体单元对高速变厚度弹塑性圆盘的应力进行了计算，可以很好地模拟变厚度圆盘。

7.2　几何模型

如图 7-1 所示，给出了变厚度圆盘的模型简图，几何尺寸如下：转盘的内径 r_1=0.65m，转盘外径 r_2=4m，转盘的厚度 $h = r^{-0.8}$ m，其中 r 为转盘的径向距离且 $r_1 \leqslant r \leqslant r_2$ 。

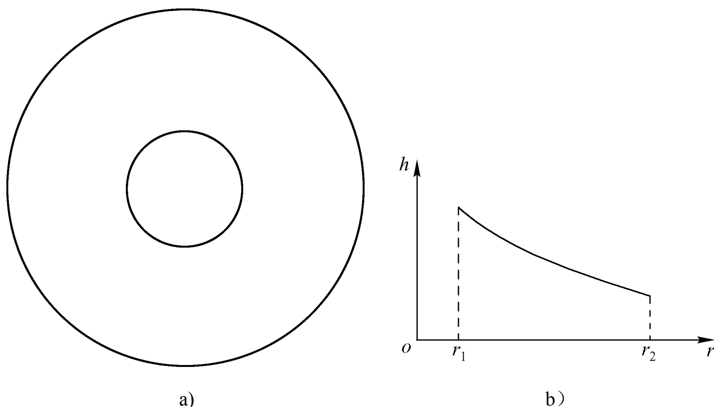


图 7-1　变厚度圆盘模型简图

a) 变厚度圆盘俯视图　b) 变厚度圆盘的变化规律示意图

7.3 材料的本构关系

变厚度圆盘的弹性模量为 210GPa、泊松比为 0.3，变厚度圆盘的应力-应变关系符合双线性等向强化模型，屈服应力为 500MPa、切线模量为 9GPa。图 7-2 给出了双线性应力-应变关系曲线，其中第一段直线的斜率即为弹性模量，第二段直线的斜率为切线模量。材料的密度为 7200kg/m^3。

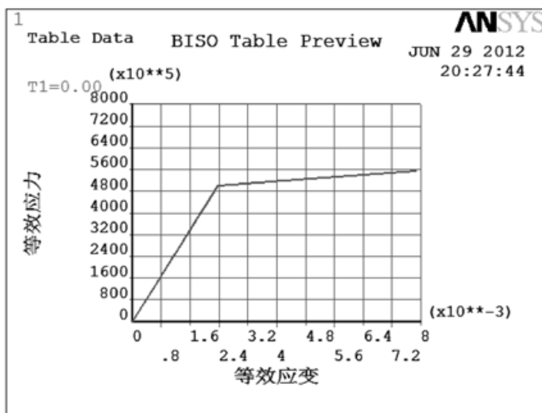


图 7-2　双线性应力-应变关系曲线

7.4 单元的选择

本章实例选用低阶 8 节点壳体单元 281 模拟变厚度圆盘。

7.5 边界条件与载荷

本章实例的变厚度圆盘为空间盘，约束圆盘内空的 UZ、UX、ROTX 和 ROTY 四个自由度，载荷为圆盘的转速，转速为 200rad/s。

7.6 GUI 操作

7.6.1 前处理

1. 定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入“the variable thickness of the disc”，单击“OK”按钮。

2. 定义参数

在命令输入窗口中输入：R1=0.65，R2=4。

3. 选择单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，弹出单元类型设置面板，如图 7-3 所示，在左边选择 Shell，然后在右边选择 3D 8node 281 单元，单击“OK”按钮，返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

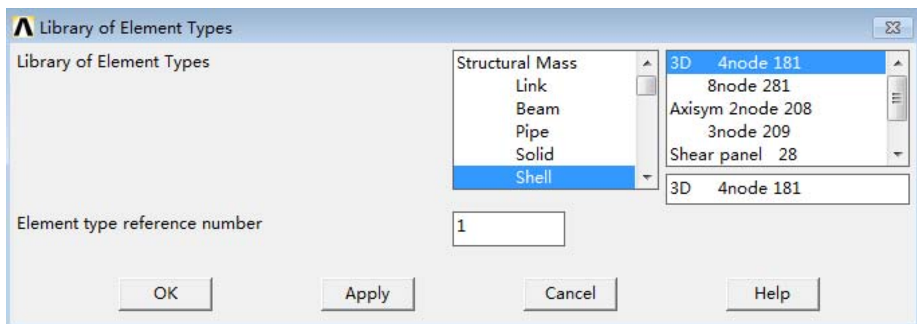


图 7-3　单元类型设置面板

4. 定义材料模型

（1）定义变厚度圆盘的应力-应变关系

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 7-4 所示，输入 EX=2.1E11、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，弹出非线性各向同性材料模型定义面板，如图 7-5 所示，输入屈服应力（Yield Stress）=5E8，切线模量（Tang Mod）=9E9，单击“OK”按钮。

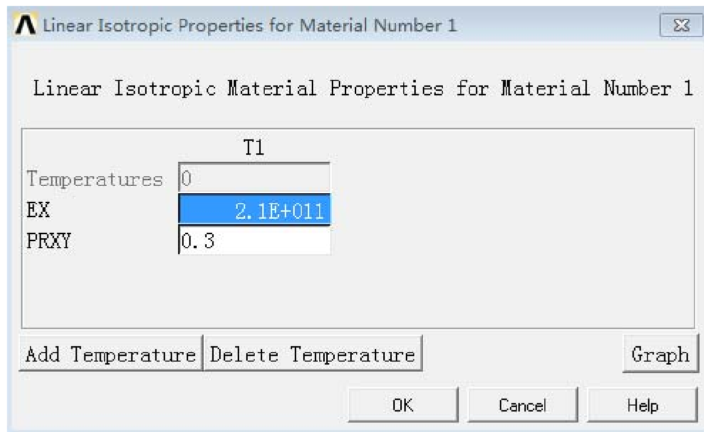


图 7-4　各向同性线弹材料定义面板

（2）定义变厚度圆盘的密度

在弹出的对话框中，继续单击 Structural→Density，弹出密度定义面板，如图 7-6 所示，输入 DENS=7200，单击“OK”按钮。选择 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

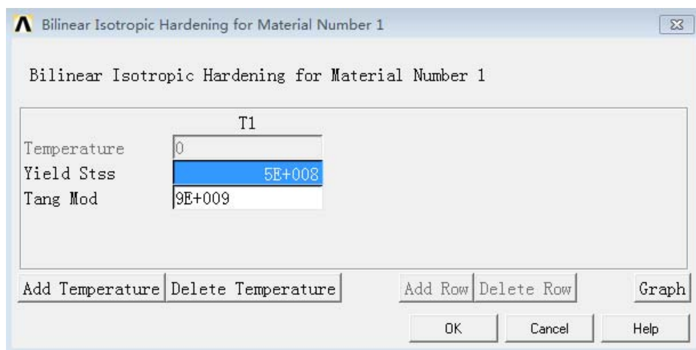


图 7-5　非线性各向同性材料模型定义面板

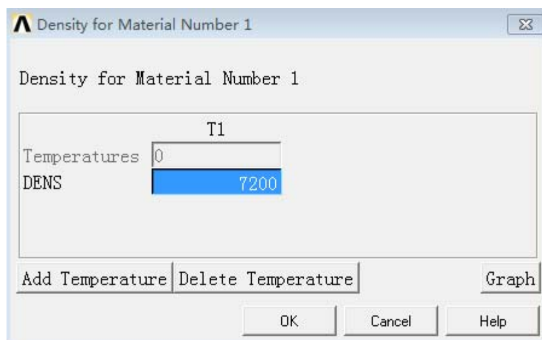


图 7-6　密度定义面板

5．定义圆盘的变厚度截面

（1）定义厚度函数

GUI：单击 Utility Menu→Parameters→Functions→Refine/Edit，弹出函数编辑器面板，如图 7-7 所示，按照面板设置函数的坐标系为柱坐标系（(X，Y，Z) interpreted in CSYS:1），输入函数表达式，然后单击 File→SAVE，在弹出的保存文件对话框中输入函数名为 BJ，单击“Save”按钮。

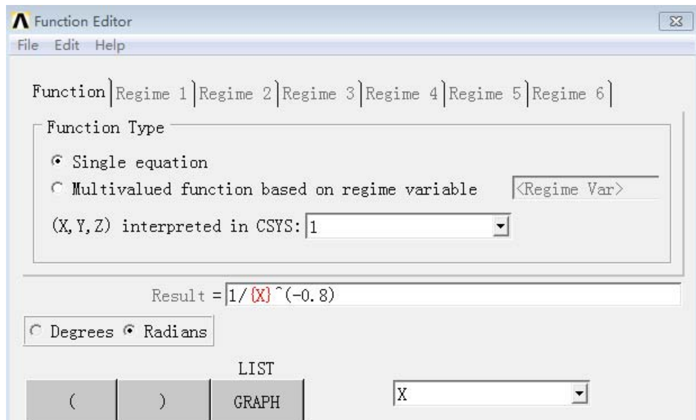


图 7-7　函数编辑器面板

（2）读入厚度函数

GUI：单击 Utility Menu→Parameters→Functions→Read File，弹出读入函数文件对话框，选择刚保存的 FC 文件，单击打开，弹出函数加载器设置面板，如图 7-8 所示，输入表格参数名（Table parameter name）为 BJ，输入完毕，单击“OK”按钮。

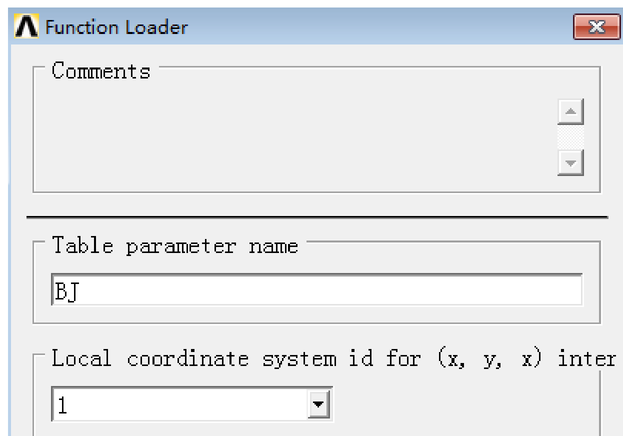


图 7-8　函数加载器设置面板

（3）定义壳体截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add/Edit，弹出创建和修改壳体截面面板，如图 7-9 所示，设置截面偏离位置（Section Offset）为底面（Bottom-Plane），选择截面函数（Section Function）为 BJ，因为是变厚度的截面，所以设置积分点数（Integration Pts）为 7，其他保持默认，单击“OK”按钮。

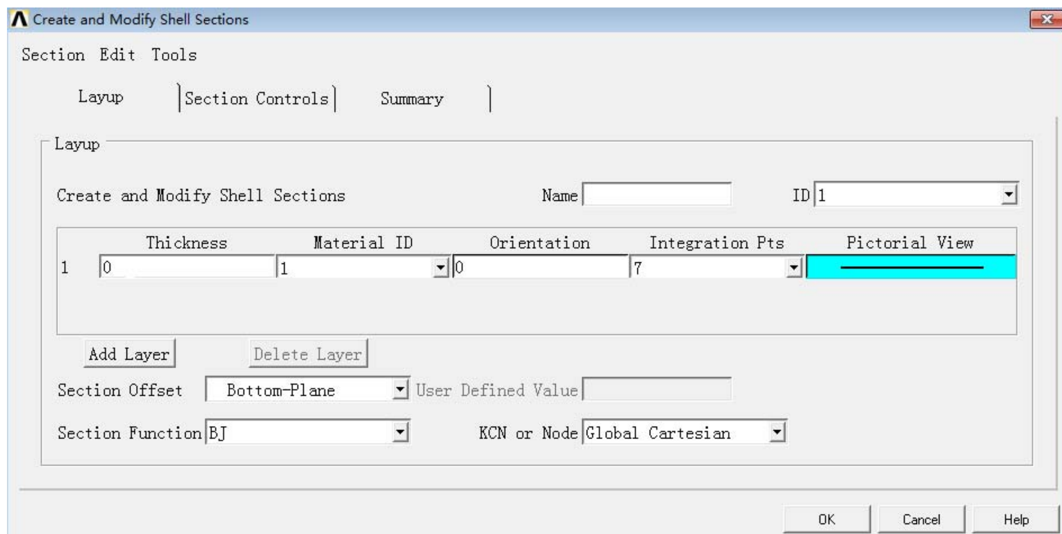


图 7-9　创建和修改壳体截面面板

6．建立模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Annulus，弹出定义圆环面板，如图 7-10 所示，输入圆环中心坐标：WPX=0、WPY=0，圆环内半径 Rad-1=R1，圆环外半径 Rad-2=R2，单击“OK”按钮。

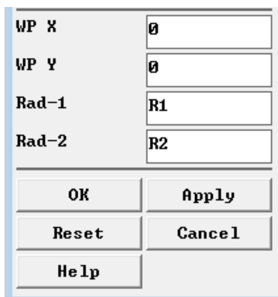


图 7-10 定义圆环面板

7．划分网格

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置网格属性

单击网格划分工具中单元属性（Element Attributes）中的“Set”按钮，弹出网格属性设置面板，如图 7-11 所示，设置截面号（Section number）为 1，其他保持默认，单击“OK”按钮。

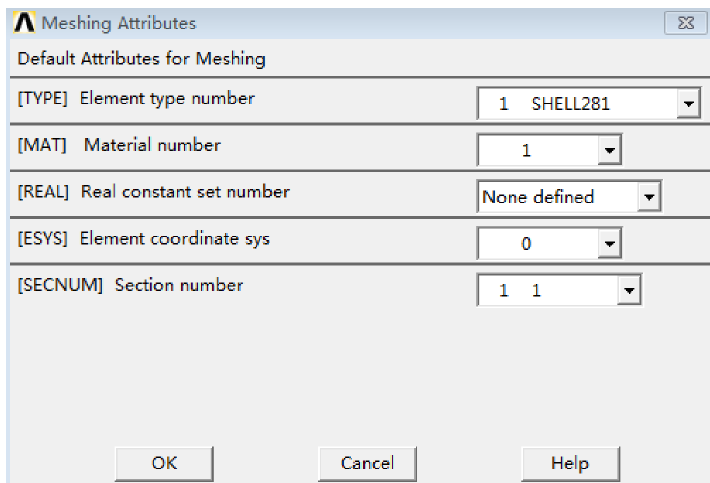


图 7-11 网格属性设置面板

（3）设置总体网格尺寸

单击网格划分工具中尺寸控制区域（Size Controls）中的总体控制中的设置（Set）按钮，弹出总体网尺寸设置面板，如图 7-12 所示，在单元尺寸中输入 0.25，单击“OK”按钮。

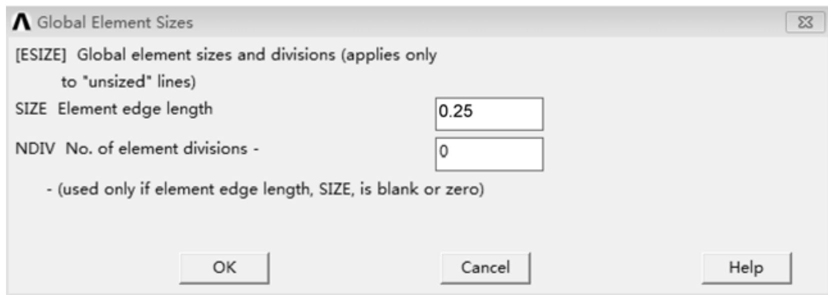


图 7-12 总体网格尺寸设置面板

（4）进行网格划分

选择网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取圆盘，单击“OK”按钮。

（5）观察变厚度有限元模型

1）设置显示单元

GUI：单击 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Size and Shape，弹出单元尺寸和形状设置面板，如图 7-13 所示，勾选显示单元（Display of element）一项，单击“OK”按钮。

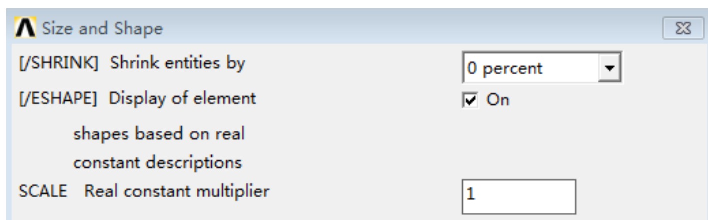


图 7-13　单元尺寸和形状设置面板

2）显示单元

GUI：单击 Utility Menu→Plot→Elements，显示变截面圆盘的有限元模型，如图 7-14 所示,由图 7-14 可知，圆盘的截面变化规律与之前输入的函数变化完全一致。

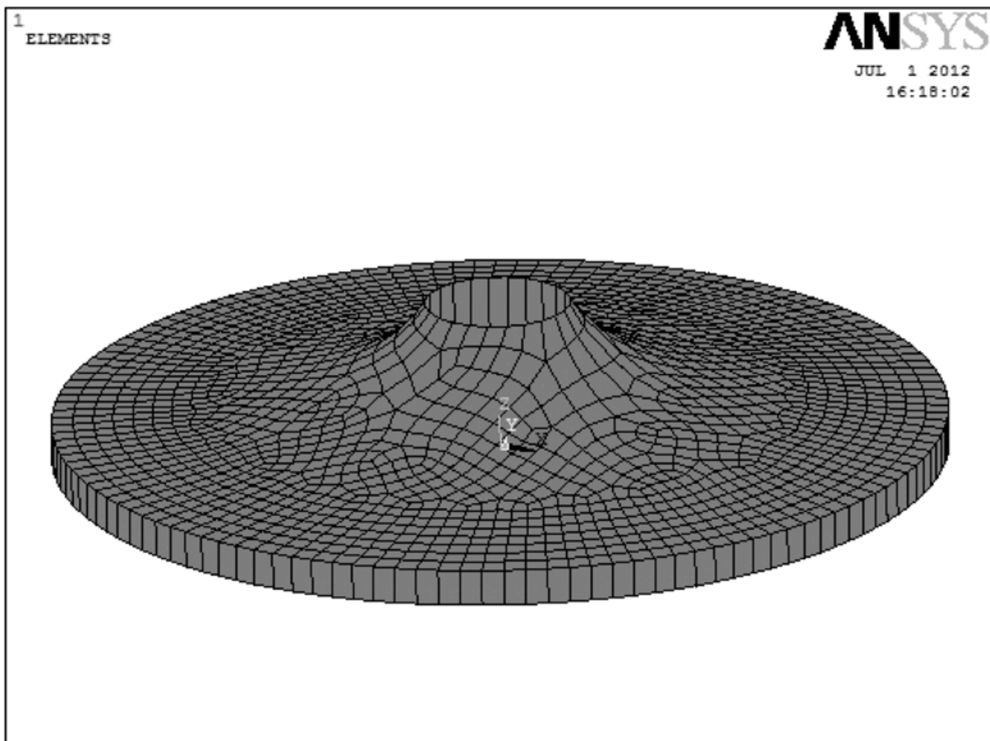


图 7-14　变截面圆盘有限元模型

7.6.2 求解

1. 设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 7-15 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

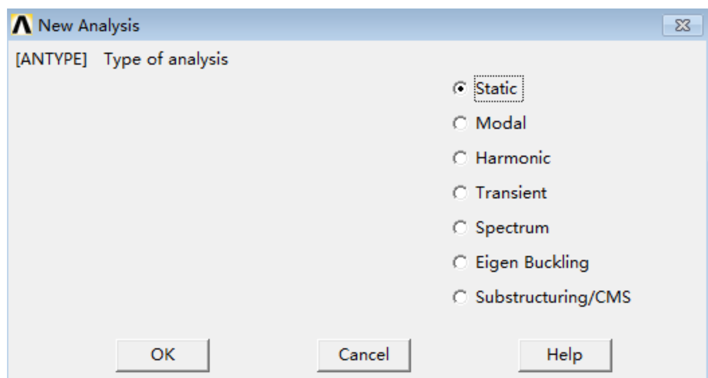


图 7-15 分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 7-16 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

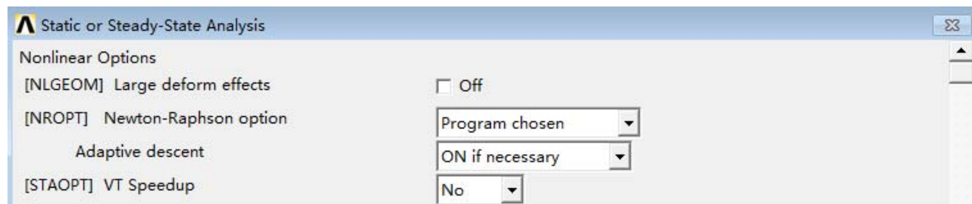


图 7-16 静态分析选项设置面板

2. 定义边界条件

（1）激活柱坐标系

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cylindrical

（2）选择圆盘内空上的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体对话框，如图 7-17 所示，设置选择实体类型为节点（Nodes），选择方法为通过位置选择（By Location），使用 X 方向位置选择（X coordinates），输入最大和最小 X 坐标都为 R1，单击“OK”按钮。

（3）将节点转换到柱坐标系

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→RotateNode→To Active CS，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

（4）施加位移约束

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 7-18 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UX 和 UZ，即固定圆盘的内孔的径向和轴向位移，单击“OK”按钮。

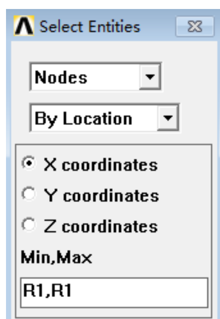


图 7-17　选择实体对话框

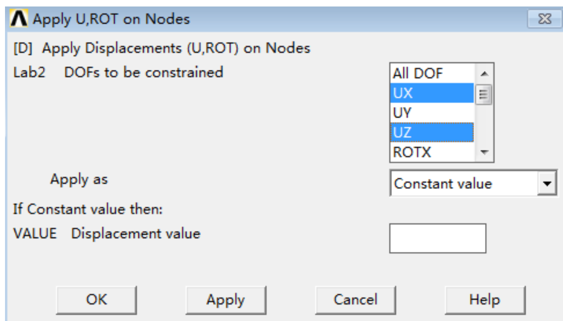


图 7-18　约束节点自由度设置面板

3. 定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Inertia→Angular Veloc→Global，弹出施加角速度面板，如图 7-19 所示，输入绕 Z 轴的角速度（OMEGZ）为 220rad/s，单击“OK”按钮。

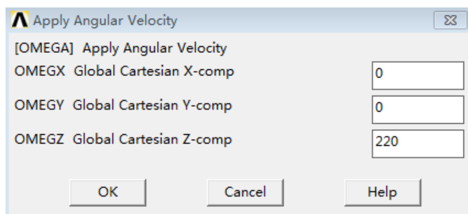


图 7-19　施加角速度面板

4. 定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出计算结果输出控制面板，如图 7-20 所示，选择 Every substep，单击“OK”按钮。

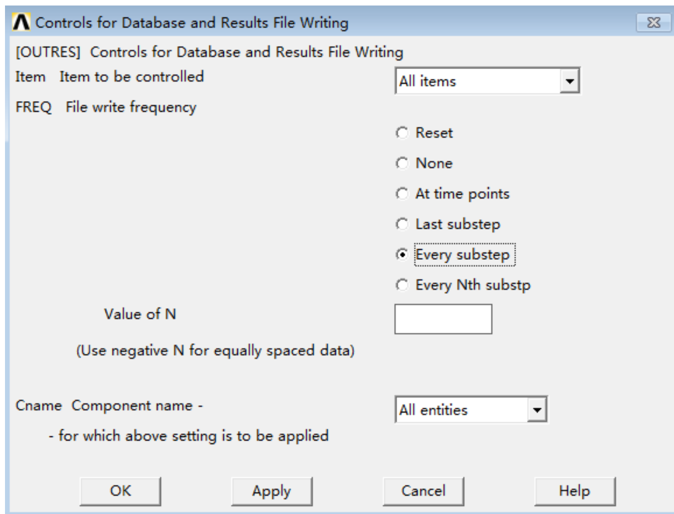


图 7-20　计算结果输出控制面板

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 7-21 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 70，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 70 和最小子步数（Minimum no. of substeps）为 70。

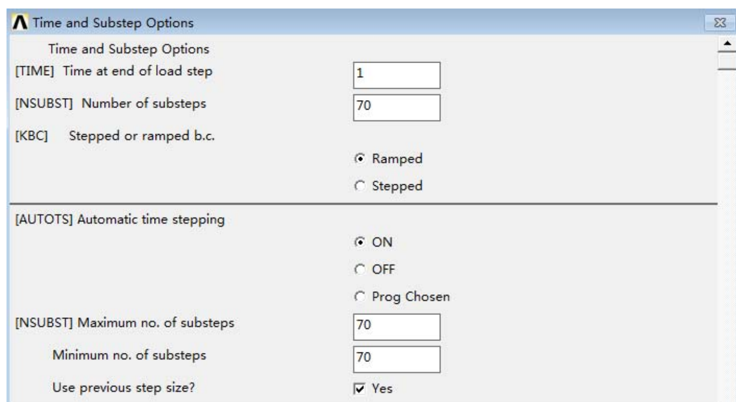


图 7-21　时间和子步选项设置面板

5. 求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

7.6.3 后处理

图 7-22～图 7-25 分别给出了求解过程中不同阶段的等效应力云图，由图 7-22～图 7-25 可知随着转速的提高，圆盘的等效应力逐渐增大，最终达到 2.07GPa。图 7-26 给出了圆盘外缘的轴向位移与转速的关系，由图 7-26 可知，随着转速的提高，轴向位移逐渐增大，并且在转速大于 80rad/s 后轴向位移迅速增大。图 7-27 给出了圆盘内孔的等效塑性应变与转速的关系，由图 7-27 可知，当转速达到 82rad/s 时，圆盘内孔处出现塑性应变。

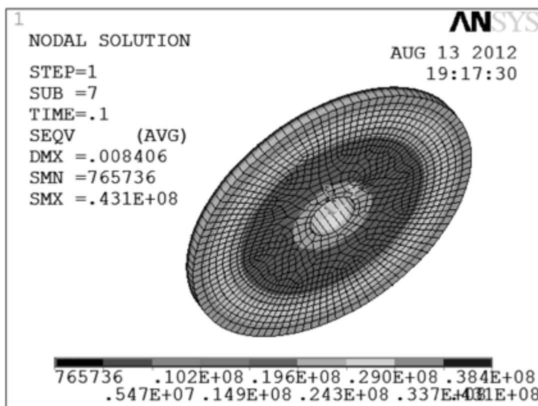


图 7-22　时间为 0.1s 时的等效应力云图

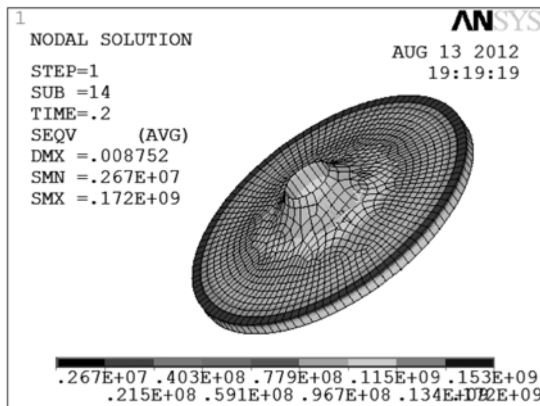


图 7-23　时间为 0.2s 时的等效应力云图



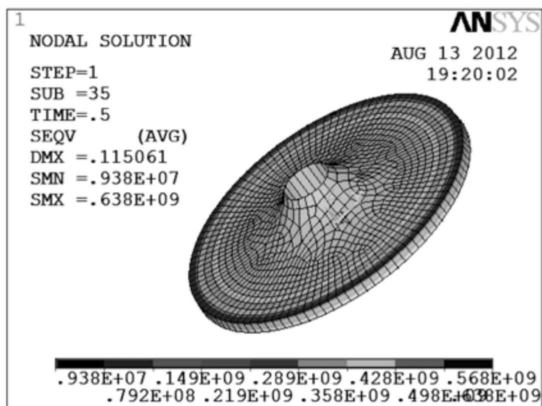


图 7-24　时间为 0.5s 时的等效应力云图

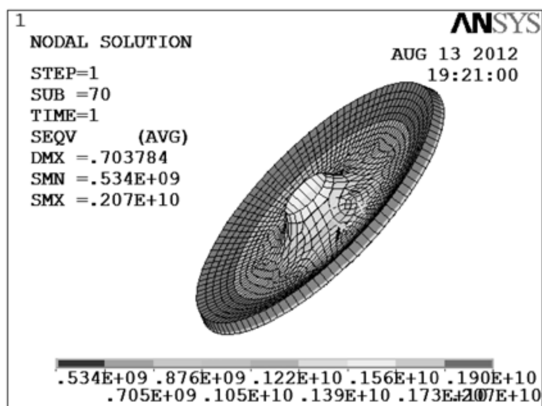


图 7-25　时间为 1s 时的等效应力云图

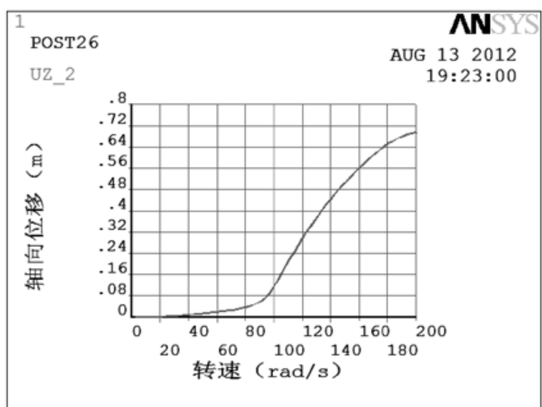


图 7-26　圆盘外缘的轴向位移与转速的关系

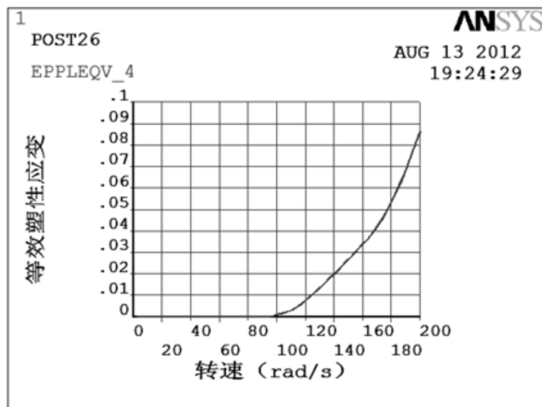


图 7-27　圆盘内空的等效塑性应变与转速的关系

7.7　命令流

```
/FILNAME the variable thickness of the disc,0          !定义文件名
!进入前处理
/PREP7
!定义参数
R1=0.65
R2=4
ET,1,SHELL281                        !定义单元
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1E+011                !定义弹性模量
MPDATA,PRXY,1,,0.3                   !定义泊松比
MPDATA,DENS,1,,7200                  !定义密度
TB,BISO,1,1,2,                       !激活双线性等向强化模型
```



```
TBTEMP,0
TBDATA,,500E6,9E9,,,,
!定义函数，用于设置变截面壳体
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'BJ'
*SET,_FNCCSYS,1
! /INPUT,EE.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,7,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: {X}^(-0.8)
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 0, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1), 0, -3, 0, 1, -1, 2, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -1, 0, 0.8, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -1, 0, 1, 2, 17, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, 99, 0, 1, -1, 0, 0
! END OF EQUATION: {X}^(-0.8)
!-->
!设置壳体截面参数
SECT,1,SHELL,,
SECDATA, 0,1,0,7
SECOFFSET,BOT
SECF,%BJ%,     0              !设置壳体截面为函数 BJ
SECCONTROL,0,0,0, 0, 1, 1, 1
!建立模型
CYL4,0,0,R1, ,R2
ESIZE,0.25,0,                 !定义网格尺寸
TYPE,     1                   !设置单元类型为 1
MAT,          1               !设置网格的材料号为 1
REAL,
ESYS,          0
SECNUM,     1
AMESH,1                       !划分面 1
!进入求解器
/SOL
ANTYPE,0                      !激活静态求解
NLGEOM,1                      !激活大变形
```

```
CSYS,1                      !激活柱坐标系
NSEL,ALL                    !选择所有节点
NSEL,S,LOC,X,R1,R1          !选择径向距离为 R1 的所有节点
NPLOT
/PREP7
NROTAT,ALL                  !将选择的节点旋转到当前的激活坐标系中
/SOL
D,ALL, , , , , ,UX,UZ, , , ,  !定义边界条件
ALLSEL,ALL                  !选择所有实体
OMEGA,0,0,200,              !设置绕 z 轴的转速为 200rad/s
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,1
AUTOTS,1
NSUBST,70,70,70,1
KBC,0
SOLVE
```



第 8 章　汽车制动器尖叫的有限元分析

8.1　引言

本章工程实例详细介绍了如何对汽车制动器的噪声进行分析。在 ANSYS 14.0 中可以使用以下三种方法进行制动器噪声分析：线性非预应力模态分析（Linear non-prestressed modal），部分非线性摄动模态分析（Partial nonlinear perturbed modal）和完全非线性摄动模态分析（Full nonlinear perturbed modal）。本章实例可以通过使用滑动摩擦接触和复数特征值求解来预测制动器的不稳定模态。

随着制动盘尺寸越来越大，由于持续摩擦产生振荡导致制动器出现噪声，在汽车制造和设计中越来越受到重视。消除或减小刹车时的制动噪声，对于提高乘员舒适性非常重要，也是汽车设计中的一个重要课题。目前，存在两种常见的理论用于描述制动噪声的现象。

- 粘性滑动理论（Stick-Slip Theory）。当静摩擦因数大于滑动摩擦因数时，制动系统发生自激振动。变化的摩擦力将能量引入到了一个不能完全将该能量消耗掉的系统从而导致制动器发生尖叫。
- 模态耦合理论（Mode-Coupling Theory）。当两个相似特征的模态彼此耦合时，会将不稳定模态引入到制动系统中，这个不稳定的模态将会是引发制动器尖叫的主要原因。

这两种理论都认为制动器发生尖叫是因为制动器中的盘-板之间发生了变化。制动噪声一般分类如下。

- 低频噪声（Low-frequency noise）。低频率噪声的一个例子是“呻吟”噪声，它主要发生在 100～1000Hz 的频率范围内。任何高于 1000Hz 的噪声都被认为是尖叫。
- 低频尖叫（Low-frequency squeal）。制动器转盘的平面模态与制动盘的弯曲模态相互耦合导致低频尖叫。
- 高频尖叫（High-frequency squeal）。制动器转盘的平面各模态之间发生耦合导致高频尖叫。

通过 ANSYS 的复模态分析可以确定低频尖叫和高频尖叫。

8.2 几何模型

如图 8-1 所示，给出了简化的盘式制动器模型。转盘厚度为 15mm，制动盘的厚度为 15mm，转盘内半径为 125mm，外半径为 175mm。制动盘的包角为 35°。

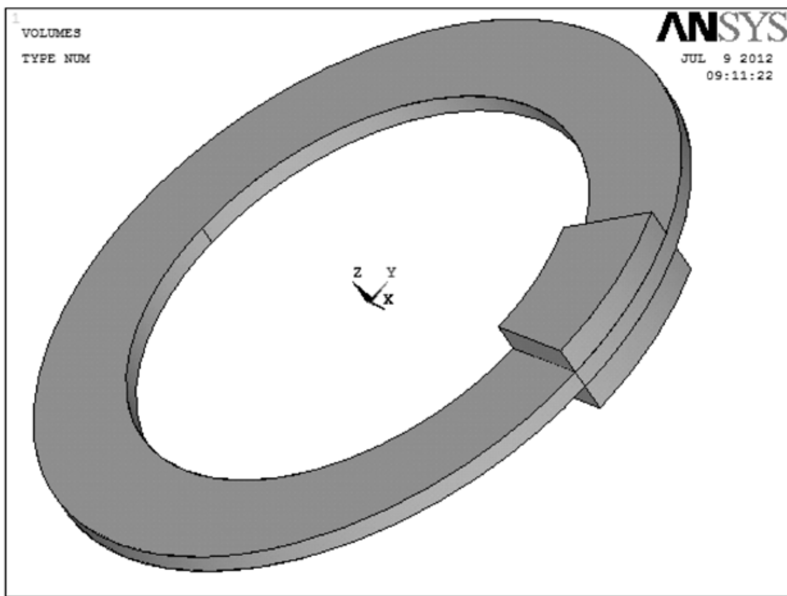


图 8-1 简化的盘式制动器模型

8.3 材料的本构模型

盘式制动器中的盘和制动片都为线弹性材料，具体参数如下：弹性模量为 200GPa、密度为 7800 kg/m^3、泊松比为 0.3。

8.4 单元的选择

本实例选用 SOLID186 模拟盘和制动片，并使用接触单元 174 和目标单元 170 模拟盘与制动片之间的滑动接触，摩擦因数设为 0.3。

8.5 边界条件与载荷

约束转盘内径上三个方向的平动位移，约束制动盘上 x 和 y 方向的位移，只允许转盘具有轴向位移。在转盘上施加 1MPa 的制动压力。图 8-2 给出了简化制动器的边界条件及载荷。

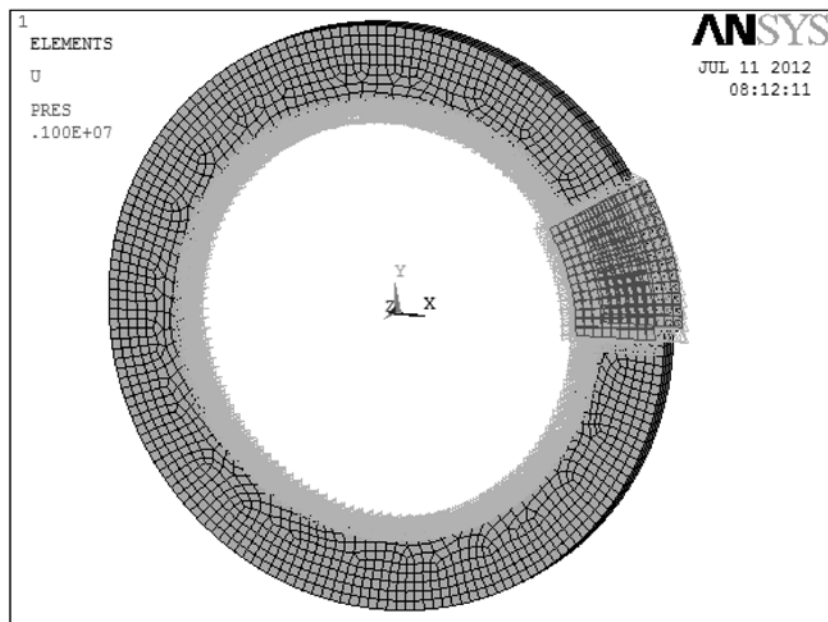


图 8-2 边界条件及载荷示意图

8.6 GUI 操作

8.6.1 前处理

1. 定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 automotive brakes screaming，单击“OK”按钮。

2. 定义参数

在命令输入窗口中输入：转盘厚度 H1=0.015，制动盘的厚度 H2=0.015，转盘内半径 R1=0.125，转盘外径 R2=0.175，制动盘的包角 ERFA=35°。

3. 选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，弹出单元类型库选择面板，如图 8-3 所示，在对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Brick 8 node 185 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 SOLID185。然后单击 Options 选项，弹出单元关键字设置面板，如图 8-4 所示，设置单元技术（Element technology）为缩减积分（Reduced integration），单击“OK”按钮，返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮，关闭对话框。



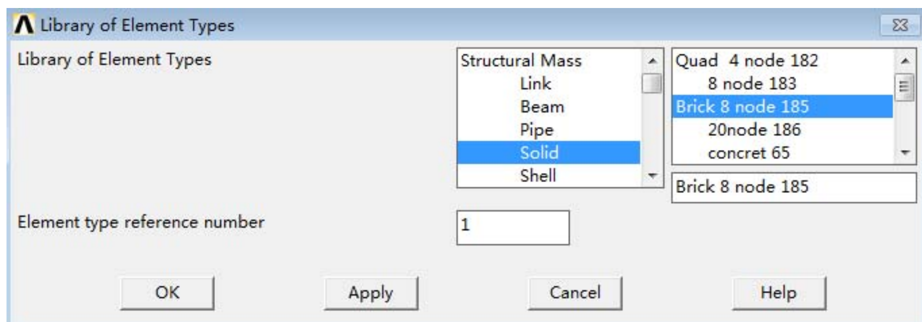


图 8-3　单元类型库选择面板

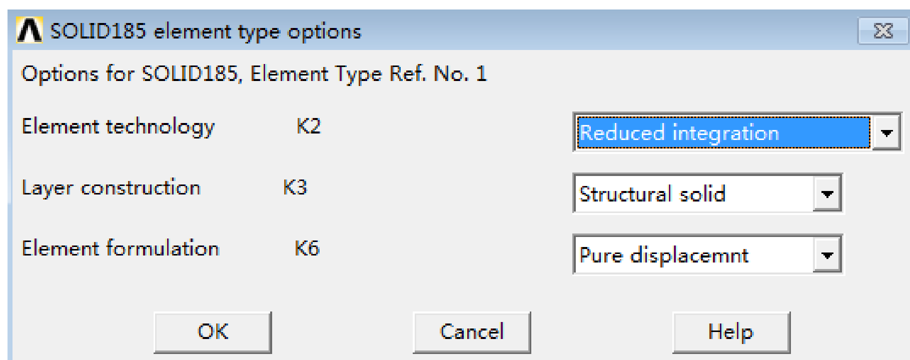


图 8-4　单元关键字设置面板

4. 定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 8-5 所示，输入 EX=2E11、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Linear→Density，弹出材料密度定义面板，如图 8-6 所示，输入 DENS=7800，单击“OK”按钮，选择 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

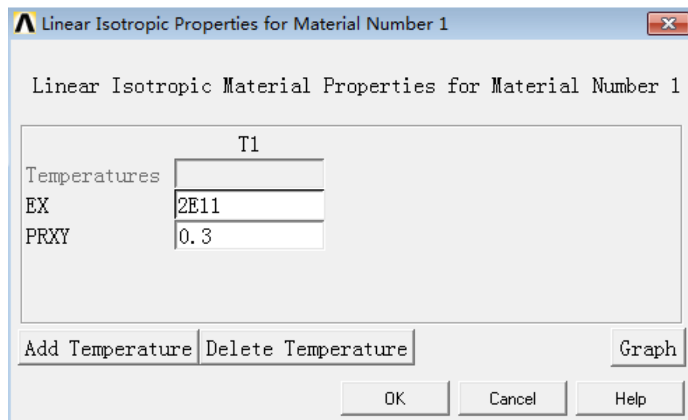


图 8-5　各向同性线弹性材料定义面板

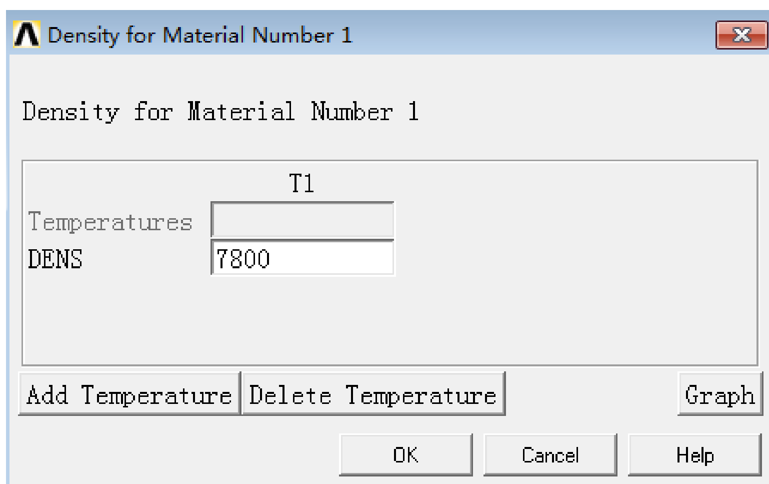


图 8-6　材料密度定义面板

5. 建立模型

（1）建立转盘模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By Dimensions，弹出创建圆柱体的设置面板，如图 8-7 所示，输入圆柱体的外半径为 R2，圆柱体的内半径为 R1，轴向厚度 Z1=0、Z2=H1，其他保持默认值，单击“Apply”按钮。

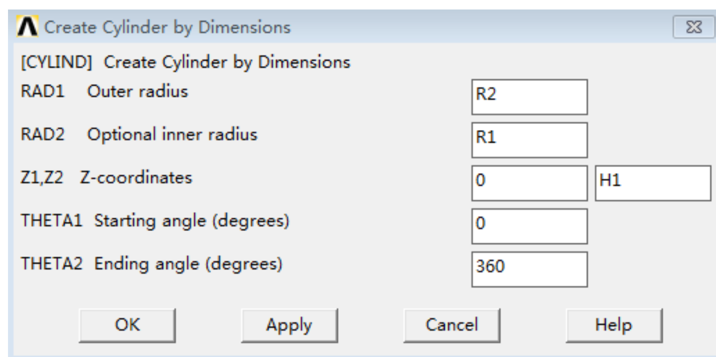


图 8-7　创建圆柱体的设置面板

（2）建立制动盘模型

在图 8-7 所示的创建圆柱体的设置面板中输入圆柱体的外半径为 R2，圆柱体的内半径为 R1，轴向厚度 Z1=H1、Z2=H1+H2，起始角度（Starting angle）为 0，终止角度（Ending angle）为 ERFA，单击“Apply”按钮，继续输入圆柱体的外半径为 R2，圆柱体的内半径为 R1，轴向厚度 Z1=-H1、Z2=0，其他保持默认值，单击“OK”按钮。

6. 网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项，并单击设置（Set）按钮，如图 8-8 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 8-9 所示。

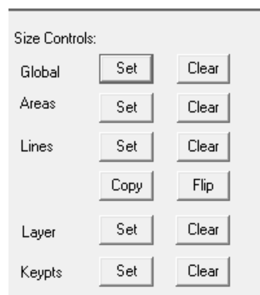


图 8-8　网格划分工具面板中的尺寸控制子面板

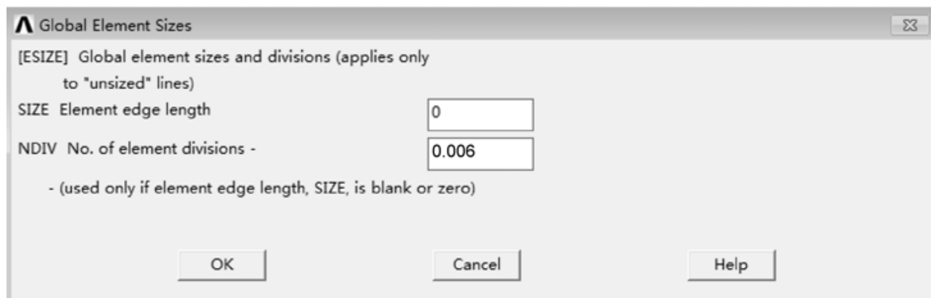


图 8-9　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.006，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

选择网格划分工具面板上的形状（Shape）为 Hex/Wedge，划分方法为扫描（Sweep），单击“Sweep”按钮，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

7. 定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出接触管理器面板，如图 8-10 所示。

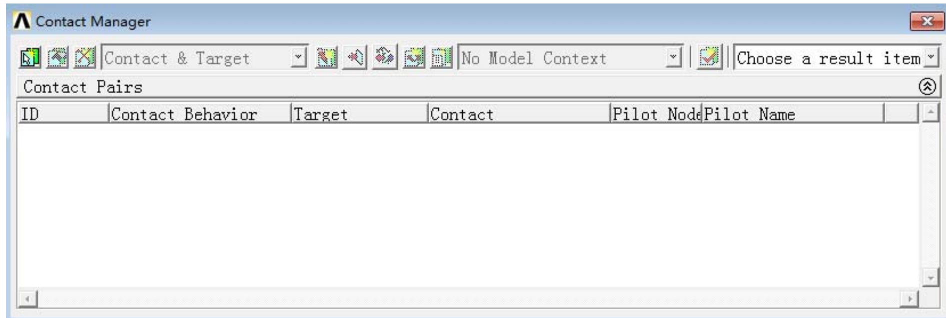


图 8-10　接触管理器面板

（2）创建转盘和制动盘之间的柔-柔接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 8-11 所示，在该面板中设置目标面为面（Areas），设置目标单元类型为柔性体（Flexible），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取转盘的面 A2，单击“Apply”按钮；然后单击图 8-11 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 8-12 所示，在该面板中设置接触面为面（Areas），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取制动盘上的面 A7，单击“Apply”按钮。单击图 8-12 中的“Next”按钮，在弹出的创建接触对面板中输入摩擦因数（Coefficient of Friction）为 0.2，单击“Create”按钮来创建接触对。按照此方法创建转盘与另一个制动盘之间的柔-柔接触，具体操作可参见本章的视频教程。

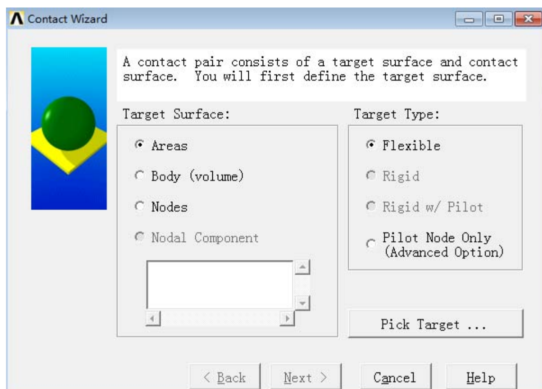


图 8-11　目标面及目标单元类型设置面板

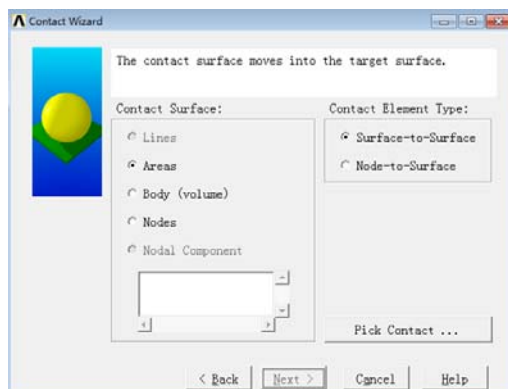


图 8-12　接触面及接触单元类型设置面板

8.6.2 求解

1. 设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 8-13 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

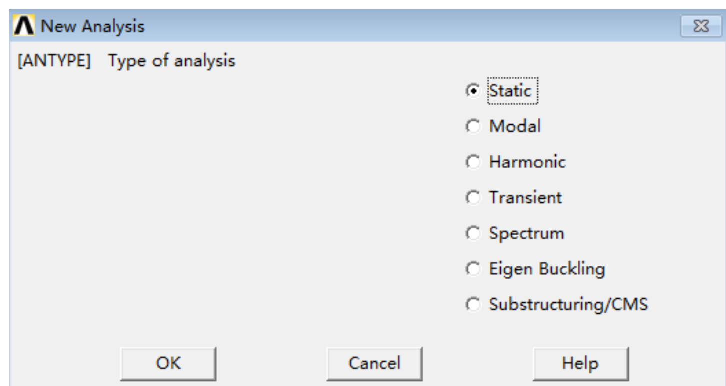


图 8-13　分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 8-14 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，选择牛顿-拉弗森（Newton-Raphson option）为完全分对称求解算法（Full N-R unsymm），其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

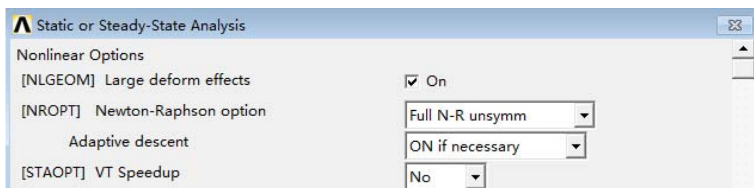


图 8-14　静态分析选项设置面板

2. 定义边界条件

（1）约束转盘内径上三个方向的平动位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出拾取对话框，拾取转盘内径上的面 A5 和 A6，单击“OK”按钮，弹出约束面自由度设置面板，如图 8-15 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 ALL DOF，单击“OK”按钮。

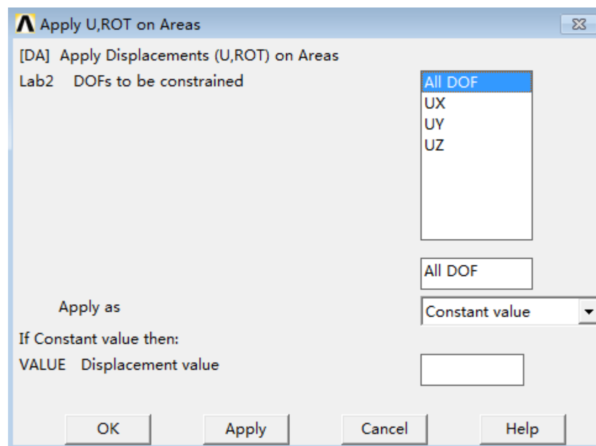


图 8-15　约束面自由度设置面板

（2）约束制动盘外面上的 x 方向位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A8 和 A13，单击“OK”按钮，弹出约束面自由度设置面板，如图 8-15 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UX，单击“OK”按钮。

（3）约束制动盘外面上的 y 方向位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A8 和 A13，单击“OK”按钮，弹出约束面自由度设置面板，如图 8-15 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UY，单击“OK”按钮。

3. 定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A8 和 A13，单击“OK”按钮，弹出在面上施加压力的设置面板，如图 8-16 所示，输入压力值（Load PRES value）为 1E6，其他保持默认值，单击“OK”按钮。

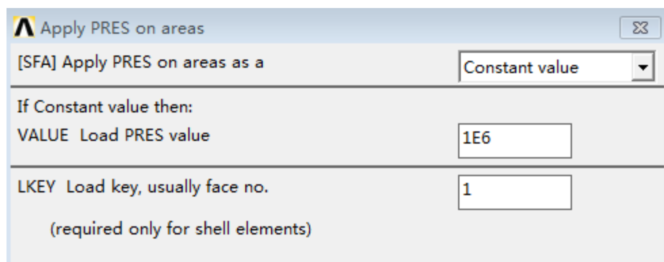


图 8-16 在面上施加压力的设置面板

4. 定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的面板上选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps Options，弹出时间和子步选项设置面板，如图 8-17 所示，计算时间（TIME）输入 1，打开自动时间步（ON），其他保持默认值，单击“OK”按钮。

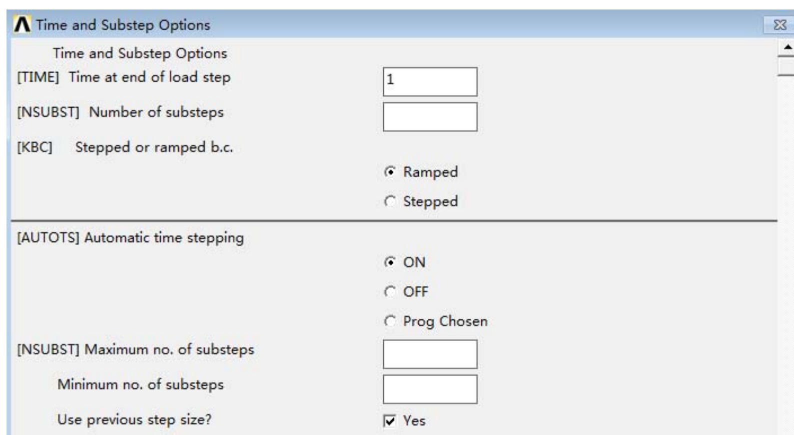


图 8-17 时间和子步选项设置面板

（3）设置重启动选项

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Restart Control，弹出重启动设置面板，如图 8-18 所示，设置重启动动作（Action）为定义（Define），重启载荷步（Load Step）为全部子步（All），文件写入频率（File write frequency）为每 *N* 个子步写入一次（Every Nth substp），*N* 值为 1（Value of N），单击“OK”按钮。

5．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解

6．求解转盘和制动盘之间摩擦转动

（1）选择转盘上目标单元的组件

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 8-19 所示，设置选择的实体类型为单元（Elements），选择方法为通过属性选择（By Attributes），在单元属性中使用单元类型号选择（Elem type num），输入最小、最大以及间隔为 2、4、2，单击“OK”按钮。

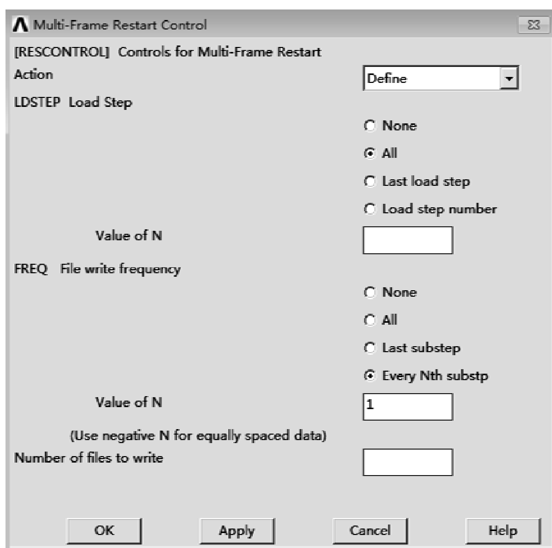


图 8-18　重启动设置面板

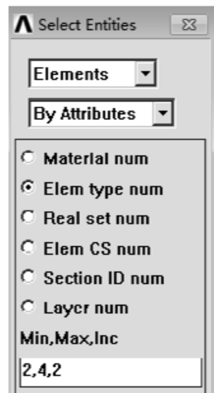


图 8-19　选择实体设置面板

（2）创建转盘上目标单元的组件

GUI：单击 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component，弹出创建组件设置面板，如图 8-20 所示，输入组件名（Component name）为 E_ROTOR，组成组件的实体类型为单元（Elements），单击“OK”按钮。

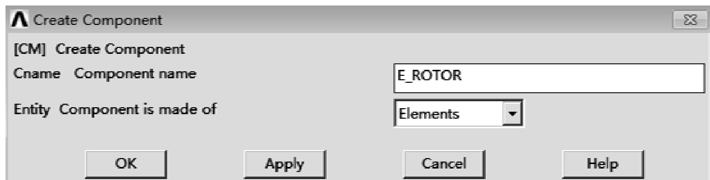


图 8-20　创建组件设置面板

（3）定义转盘和制动盘之间的相对转速

在命令窗口输入命令：

```
cmrotate,E_ROTOR,,,2,
```

（4）定义求解时间

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps Options，弹出时间和子步选项设置面板，如图 8-17 所示，计算时间（TIME）输入 1，其他保持默认值，单击“OK”按钮。

（5）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

7．进行摄动模态分析

（1）设置重启动为摄动分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Restart ，弹出重启动设置面板，如图 8-21 所示，设置重启动动作（Action）为摄动分析（Perturb），单击“OK”按钮，弹出摄动求解设置面板，如图 8-22 所示，保存默认设置，单击“OK”按钮。

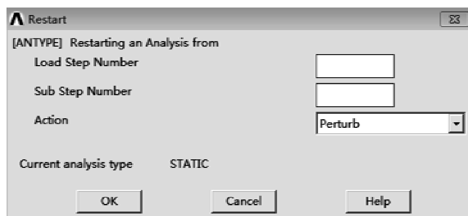


图 8-21 重启动设置面板

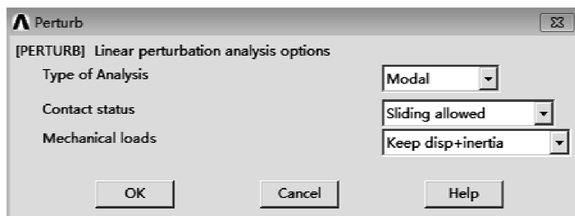


图 8-22 摄动求解设置面板

（2）重新生成单元矩阵

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Perturb LS。

（3）设置模态求解方法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，弹出模态分析设置面板，如图 8-23 所示，选择模态求解方法为非对称法（Unsymmetric），模态提取数量（No. of modes to extract）为 30 阶，扩展模态阶数（No. of modes to expand）为 30 阶，其他保存默认值，单击“OK”按钮。

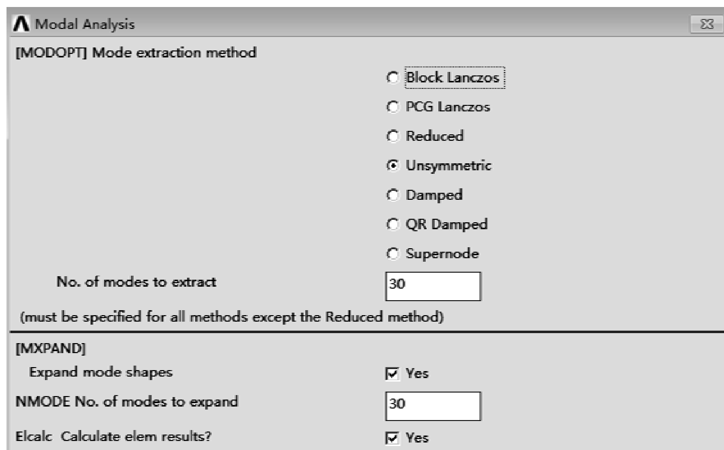


图 8-23 模态分析设置面板

（4）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

8.6.3 后处理

图 8-24～图 8-26 分别是不同阶数的模态振型图，但这几个振型图都是稳定的，不会使制动器出现尖叫现象，图 8-27 给出了制动器 11 阶模态的振型图，该阶模态中虚部为非 0 的正数，因此为不稳定模态振型，会引起制动器发生尖叫。

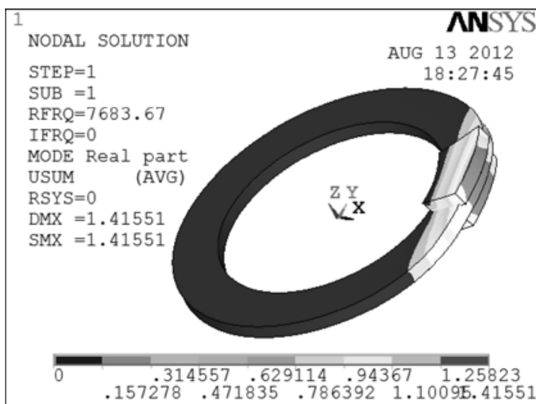


图 8-24　制动器一阶模态振型图

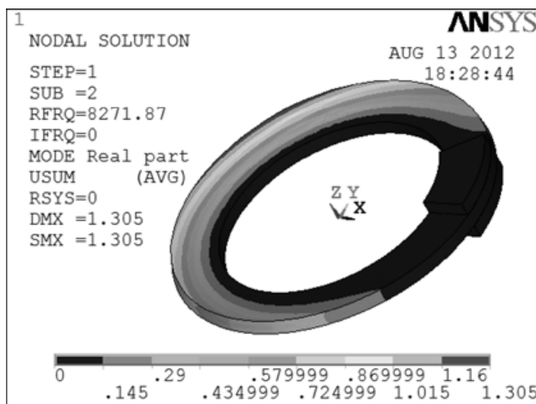


图 8-25　制动器二阶模态振型图

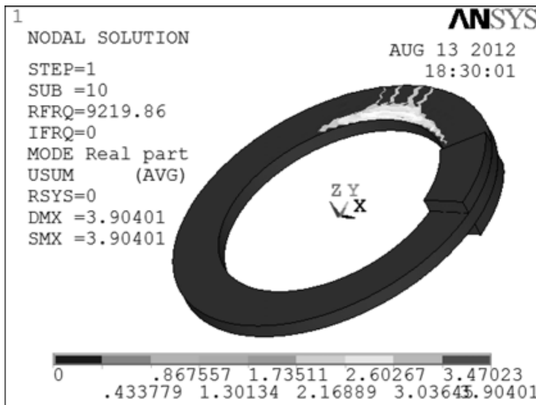


图 8-26　制动器 10 阶模态振型图

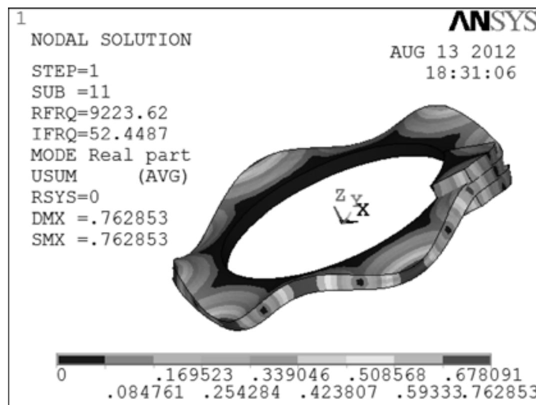


图 8-27　制动器 11 阶模态振型图

8.7　命令流

```
/FILNAME, automotive brakes screaming,0          !定义文件名
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
```



```
H1=0.015
H2=0.015
R1=0.125
R2=0.175
ERFA=35
ET,1,SOLID185 !定义单元
KEYOPT,1,2,1 !设置单元积分为缩减积分算法
MP,EX,1,2E11 !定义弹性模量
MP,PRXY,1,0.3 !定义泊松比
MP,DENS,1,7800 !定义密度
CYLIND,R2,R1,0,H1,0,360, !建立模型
CYLIND,R1,R2,H1,H1+H2,0,ERFA,
CYLIND,R1,R2,-H2,0,0,ERFA,
!设置总体网格尺寸
ESIZE,0.006
VSWEEP,ALL    !采用体扫描网格划分
!使用接触向导，定义接触对
!接触对的固有参数
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,CWZ,GSAV,,TEMP
MP,MU,1,0.2 !定义该接触对之间的摩擦因数
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! GENERATE THE TARGET SURFACE
ASEL,S,,,2
CM,_TARGET,AREA
TYPE,2
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
```

```
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! GENERATE THE CONTACT SURFACE
ASEL,S,,,7
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH PATCH (FSK QT-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,CWZ,GSAV
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!使用接触向导，定义另一个接触对
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
```



```
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,CWZ,GSAV,,TEMP
MP,MU,1,0.2
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! GENERATE THE TARGET SURFACE
ASEL,S,,,1
CM,_TARGET,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! GENERATE THE CONTACT SURFACE
ASEL,S,,,14
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH PATCH (FSK QT-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
```

```
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,CWZ,GSAV
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!进入求解器
/SOLU
ANTYPE,STATIC                      ! 激活静态分析
NROPT,UNSYM                        ! 使用非对称 N-R 算法
NLGEOM,ON                          ! 激活大变形
!定义边界条件
DA,5,ALL,
DA,6,ALL,
DA,8,UX,
DA,8,UY,
DA,13,UX,
DA,13,UY,
!定义载荷
SFA,8,1,PRES,1E6
SFA,13,1,PRES,1E6
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON                          !激活自动时间步
TIME,1.0
RESCONTROL,DEFINE,ALL,1            !设置重启动
SOLVE                              ! 执行静态求解
ESEL,ALL                           !选择所有单元
ESEL,S,TYPE,,2,4,2                 !选择单元类型为 2 和 4 的单元
EPLOT
ALLSEL,ALL                         !选择所有实体
CM,E_ROTOR,ELEM                    !定义单元组件
CMROTATE,E_ROTOR,,,2,              !转动目标单元，使得接触对之间产生相对滑动!
TIME,2.0                           !设置求解结束时间
SOLVE                              !开始求解
```



```
FINISH
/SOLU
ANTYPE,STATIC,RESTART,,,PERTURB          !设置重启动类型为摄动分析
PERTURB,MODAL,,,,                        !执行摄动模态分析
SOLVE,ELFORM                             !重新生成单元矩阵
MODOPT,UNSYM,30                          !使用非对称求解算法
MXPAND,30,,,                             !扩展模态为 30 阶
SOLVE
FINISH
/POST1
FILE,,RSTP
```

第 9 章　纤维缠绕复合材料压力容器的可靠性分析

9.1 引言

本章实例介绍了纤维缠绕复合材料压力容器（COPV）的可靠性分析方法。该模型在分层的复合材料中使用了增强纤维。本章实例使用有限元单元法，首先进行力学分析获得相应的力学响应，然后根据计算结果进行失效分析来确定纤维缠绕复合材料压力容器最薄弱的部分。为了进行压力容器的优化设计，本实例分析过程中会输出线性应力。

使用缠绕方法制造纤维缠绕复合材料压力容器，其制造的基本过程是将高强度的纤维连续缠绕到薄金属壳体的外面。因为该结构具有优异的耐腐蚀性和高强度质量比，所以 COPV 通常用于重要领域（如深海探测和太空任务）。

一个典型的 COPV 通常含有大量的纤维增强层，并呈现出复杂的整体材料正交各向异性。当 COPV 承受严酷的运行载荷时，由于纤维组织发生变化，其材料性能可能发生明显的变化。COPV 材料性能与载荷之间的关系是很难通过实验手段获得的，因此，设计人员和研究人员经常进行有限元模拟获得 COPV 的力学性能。

9.2 几何模型

压力容器的管壁是由一个各向同性的铝合金内胆和四层 T800/EPOXY 纤维增强层组成的复合材料结构。压力容器的入口和出口仅由铝合金组成，由于模型的对称性，本实例取 1/8 模型进行分析。图 9-1 给出了纤维缠绕复合材料压力容器的模型简图，几何尺寸如下：R1=0.015m；R2=0.02m；R3=0.1m；R4=R1+R2+R3；L1=0.009m；L2=0.25m。

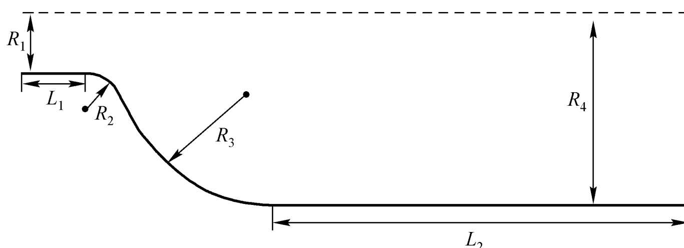


图 9-1　纤维缠绕复合材料压力容器的模型简图

对于这个问题，复合压力容器壁模型由两个不同的部分组成。

（1）入口处仅有铝合金内胆材料。

（2）在过渡区和主管壁包括铝合金内胆材料、均质基体和强化纤维。

使用壳体截面定义基体材料的铺层。表 9-1 给出了截面性质，包含材料号、层的厚度和材料铺层的方向角度和积分点数。

表 9-1 压力容器金属壁面的截面参数

截　面	层 厚 度	材 料 号	材料方向角	积分点数量
1（主壁面）	1.9E-3	1	0	3
	0.1E-3	2	0	3
	0.1E-3	2	0	3
	0.1E-3	2	0	3
	0.1E-3	2	0	3
2（入口/出口壁面）	1.9E-3	1	0	3

这里假设，在每个增强层的纤维有一个独特的横截面面积、材料性能、间距、方向，因此，使用弥散强化的方法。纤维特性（材料性能、截面面积、间距、方向和位置）具体如表 9-2 所示。

表 9-2 强化纤维参数

强化纤维层	材 料 号	强化纤维截面面积	相邻的强化强化纤维距离	强化纤维角	强化纤维基体单元
1	3	0.5E-4	1.0	45	2
2	3	0.5E-4	1.0	-45	3
3	3	0.5E-4	1.0	45	4
4	3	0.5E-4	1.0	-45	5

9.3 材料的本构模型

复合材料压力容器包括以下三种材料：铝合金内胆的弹性模量为 72GPa、泊松比为 0.29、正割热膨胀系数为 5E-6；均质基体（Bonding Matrix）的弹性模量 8.82GPa、泊松比为 0.33、正割热膨胀系数为 5E-6；强化纤维的弹性模量为 305GPa，正割热膨胀系数为 1E-6。

9.4 复合材料压力容器的失效参数

表 9-3～表 9-5 分别给出了铝合金内胆、均质基体和强化纤维在不同温度下、不同方向上的失效应力，作为复合材料压力容器可靠性分析的计算依据。

表 9-3 铝合金内胆失效参数列表

温　度	x 方向失效拉伸应力	y 方向失效拉伸应力	z 方向失效拉伸应力
500°C	700MPa	700MPa	700MPa
	x 方向失效压缩应力	y 方向失效压缩应力	z 方向失效压缩应力

（续）

温　　度	x 方向失效拉伸应力	y 方向失效拉伸应力	z 方向失效拉伸应力
500°C	−700MPa	−700MPa	−700MPa
	xy 方向失效压缩应力	yz 方向失效压缩应力	xz 方向失效压缩应力
	455MPa	455MPa	455MPa
900°C	x 方向失效拉伸应力	y 方向失效拉伸应力	z 方向失效拉伸应力
	490MPa	490MPa	490MPa
	x 方向失效压缩应力	y 方向失效压缩应力	z 方向失效压缩应力
	490MPa	490MPa	490MPa
	xy 方向失效压缩应力	yz 方向失效压缩应力	xz 方向失效压缩应力
	255MPa	255MPa	255MPa

表 9-4　均质基体失效参数列表

温　　度	x 方向失效拉伸应力	y 方向失效拉伸应力	z 方向失效拉伸应力
500°C	120MPa	120 MPa	120 MPa
	x 方向失效压缩应力	y 方向失效压缩应力	z 方向失效压缩应力
	−240 MPa	−240 MPa	−240 MPa
	xy 方向失效压缩应力	yz 方向失效压缩应力	xz 方向失效压缩应力
	455MPa	455MPa	455MPa
900°C	x 方向失效拉伸应力	y 方向失效拉伸应力	z 方向失效拉伸应力
	90MPa	90MPa	90MPa
	x 方向失效压缩应力	y 方向失效压缩应力	z 方向失效压缩应力
	−150MPa	−150MPa	−150MPa
	xy 方向失效压缩应力	yz 方向失效压缩应力	xz 方向失效压缩应力
	255MPa	255MPa	255MPa

表 9-5　强化纤维失效参数列表

温　　度	x 方向失效拉伸应力	y 方向失效拉伸应力	z 方向失效拉伸应力
500°C	1900MPa	40MPa	40MPa
	x 方向失效压缩应力	y 方向失效压缩应力	z 方向失效压缩应力
	−1080MPa	−222MPa	−222MPa
	xy 方向失效压缩应力	yz 方向失效压缩应力	xz 方向失效压缩应力
	455MPa	455MPa	455MPa
900°C	x 方向失效拉伸应力	y 方向失效拉伸应力	z 方向失效拉伸应力
	1650MPa	30MPa	30MPa
	x 方向失效压缩应力	y 方向失效压缩应力	z 方向失效压缩应力
	−800MPa	−111MPa	−111MPa
	xy 方向失效压缩应力	yz 方向失效压缩应力	xz 方向失效压缩应力
	255MPa	255MPa	255MPa

9.5　单元的选择

本章实例选用 SHELL281 模拟复合材料压力容器的铝合金内胆和均质基体，并设置关键

字为存储所有数据，强化纤维使用 REINF265 单元模拟。

9.6 边界条件与载荷

1/8 的复合材料压力容器在 *DC*、*AB* 和 *BC* 边均为对称边界条件（图 9-2）。在复合材料压力容器内表面施加 3MPa 的均匀压力，此外复合材料压力容器的内表面温度为 1000°C，外表面温度为 500°C，沿着复合材料压力容器的厚度方向存在着 500°C 的温差，因此沿着复合材料压力容器的厚度方向每一层递减 100°C，强化纤维的温度载荷会自动施加给均质基体。

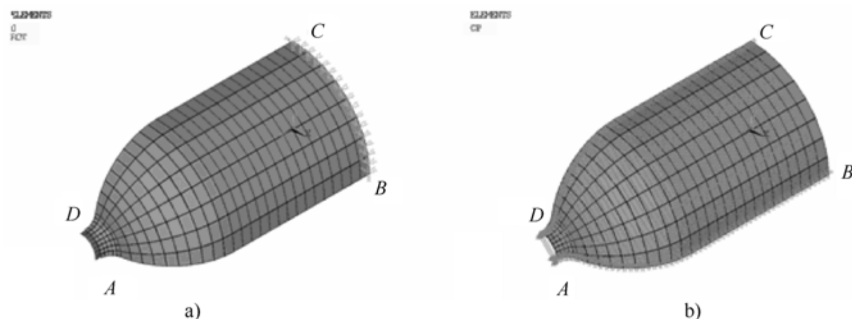


图 9-2 COPV 边界条件

9.7 GUI 操作

9.7.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 analysis of composite pressure vessels，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入：R1=0.015，R2=0.02，R3=0.1，R4=R1+R2+R3，L1=0.009，L2=0.25。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 SHELL，然后在右边选择 8node 281 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 SHELL181。然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置存储层数据（Storage of layer data）为存储所有层数据（All layers），单击“OK”按钮。返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮，关闭对话框。

4．定义材料模型

（1）定义铝合金内胆材料

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在弹出的面板中输入 EX=72E9、PRXY=0.29，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic，在弹出的面板中输入 ALPX=5E-6，单击“OK”按钮，

（2）定义均质基体材料

选择 Material→New Model，单击“OK”按钮。GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在弹出的面板中输入 EX=8.82E9、PRXY=0.33，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic，在弹出的面板中输入 ALPX=5E-6，单击“OK”按钮。

（3）定义强化纤维材料

选择 Material→New Model，单击“OK”按钮。GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在弹出的面板中输入 EX=3.05E11，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic，在弹出的面板中输入 ALPX=1E-6，单击“OK”按钮，选择 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

5．定义复合材料失效参数

（1）定义复合材料失效温度范围

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Failure Criteria→Temp Variation，在弹出的对话框中选择材料 1，单击“OK”按钮，弹出定义失效温度面板，如图 9-3 所示，输入温度 1 为 500，温度 2 为 900，单击“OK”按钮。

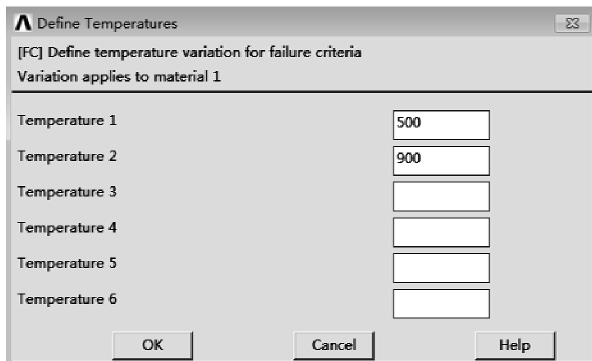


图 9-3　定义失效温度面板

（2）定义材料 1 的失效参数

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Failure Criteria→Add/Edit，在弹出的对话框中选择材料 1，单击“OK”按钮，弹出失效参数选择面板，如图 9-4 所示，在面板左侧选择应力（Stress），右侧选择 *x* 方向拉伸应力（Tension SXTEN），单击“OK”按钮，弹出失效参数输入面板，如图 9-5 所示，输入 500°的 *x* 方向拉伸失效应力为 700E6，900°的 *x* 方向拉伸失效应力为 490E6，单击“OK”按钮。其他失效参数照此输入，具体操作参见本章视频操作。

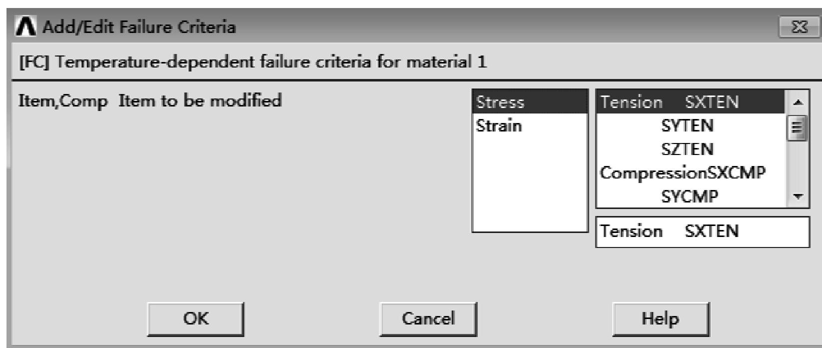


图 9-4 失效参数选择面板

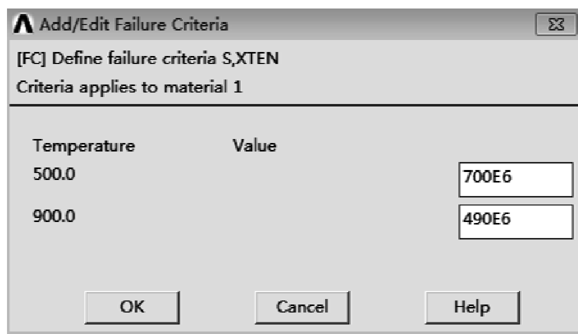


图 9-5 失效参数输入面板

6．定义壳体截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add / Edit，弹出铝合金内胆截面设置面板，如图 9-6 所示，输入铝合金内胆的厚度为 0.0019，材料号选择为 1，积分点为 5 个，截面偏移（Section Offset）为底面偏移（Bottom-Plane），单击“OK”按钮。输入 ID 号为 2，单击四次添加层（Add Layer）按钮，按照均质基体截面设置面板输入数据，如图 9-7 所示，输入完毕，单击“OK”按钮。

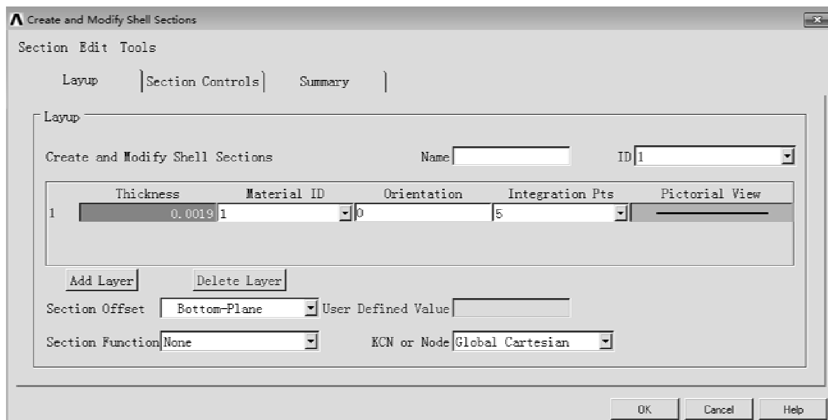


图 9-6 铝合金内胆截面设置面板

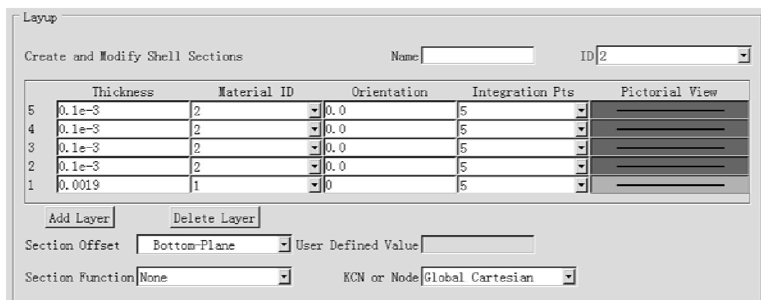


图 9-7　均质基体截面设置面板

7．定义强化纤维截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Reinforcing→Add / Edit，弹出强化纤维截面设置面板，如图 9-8 所示，按照图 9-8 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

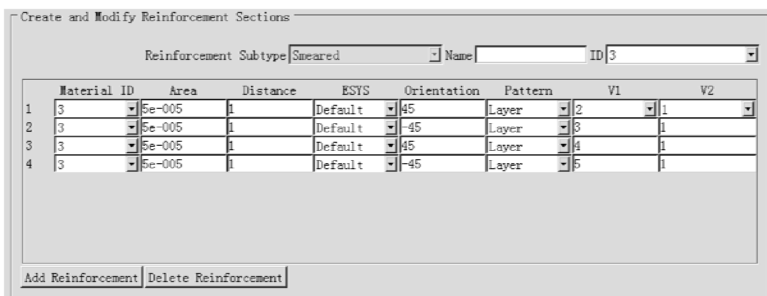


图 9-8　强化纤维截面设置面板

8．建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出图 9-9 所示的在激活坐标系中定义关键点面板，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=R1、Y=0、Z=L1+R2+R3+L2，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2，X=R1、Y=0、Z=R2+R3+L2，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=R1、Y=0、Z=R3+L2，单击“Apply”按钮；继续输入关键号为 4，X=R1+R2、Y=H、Z=R3+L2，单击“Apply”按钮；继续输入关键号为 5，X= R1+R2+R3、Y=0、Z= L2+R3，单击“Apply”按钮；继续输入关键号为 6，X= R4、Y=0、Z= L2，单击“Apply”按钮；继续输入关键号为 7，X= R4、Y=0、Z= 0，单击“Apply”按钮；继续输入关键号为 8，X= 0、Y=0、Z= 0，单击“Apply”按钮；继续输入关键号为 9，X= 0、Y=0、Z= L1+R2+R3+L2，单击“OK”按钮。

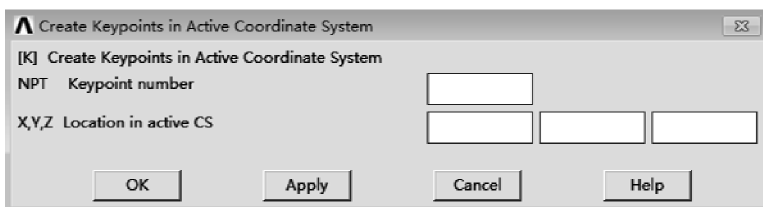


图 9-9　定义关键点面板

（2）定义线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 1 和 2，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 2 和 3，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 3 和 4，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 4 和 5，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 5 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 6 和 7，单击“OK”按钮。

（3）定义线圆角

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Line Fillet，弹出拾取对话框，拾取线 L2 和 L3，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 9-10 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为 R2，单击“Apply”按钮；返回拾取对话框，继续拾取线 L4 和 L5，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 9-10 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为 R3，单击“OK”按钮。

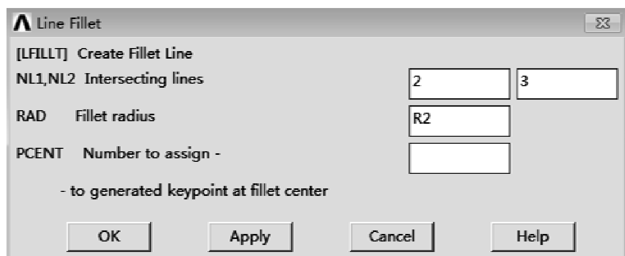


图 9-10 直线圆角设置面板

（4）将线绕轴旋转成面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→About Axis，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，然后继续选择关键点 8 和 9，单击“OK”按钮，弹出线绕轴扫描设置面板，如图 9-11 所示，输入角度为–90°，单击“OK”按钮。

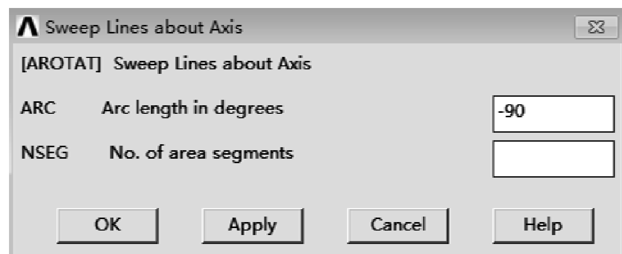


图 9-11 线绕轴扫描设置面板

9．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 9-12 所示，按照图 9-12 进行设置，单击“OK”按钮。

（3）设置网格总体尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 9-13 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 9-14 所示。

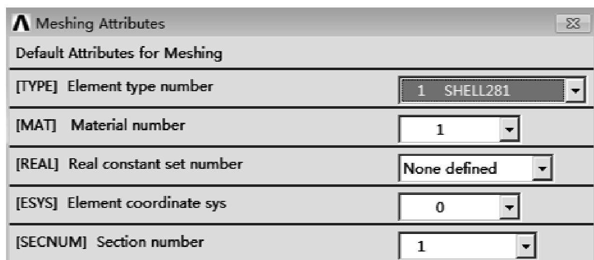


图 9-12 网格属性设置面板



图 9-13 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

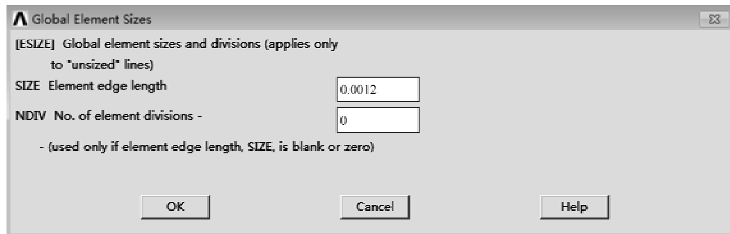


图 9-14 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.0012，单击“OK”按钮。

（4）划分压力容器入口网格

选择网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取压力容器的入口面 A1，单击“OK”按钮。

（5）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 9-12 所示，将截面号（Section number）设置为 2，其他与图 9-12 的设置一样。

（6）设置网格总体尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 9-13 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 9-14 所示。该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.004，单击“OK”按钮。

（7）划分压力容器的均质基体网格

选择网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取压力容器的入口面 A2，单击“OK”按钮。

（8）设置网格总体尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设

置（Set）按钮，如图 9-13 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 9-14 所示。该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.008，单击“OK”按钮。

（9）划分压力容器的均质基体网格

选择网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取压力容器的入口面 A3，单击“OK”按钮。

（10）设置网格总体尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 9-13 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 9-14 所示。该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.016，单击“OK”按钮。

（11）划分压力容器的均质基体网格

选择网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取压力容器的入口面 A4，单击“OK”按钮。

（12）选择均质基体单元

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 9-15 所示，按照图 9-15 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

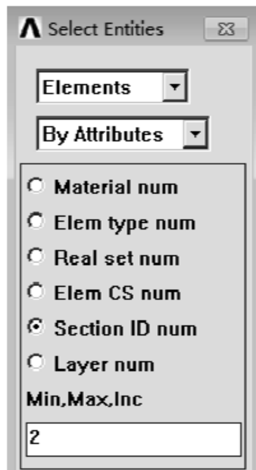


图 9-15　选择实体设置面板

（13）生成强化纤维单元

目前 ANSYS14.0 暂不支持强化纤维单元的 GUI 操作，可输入以下命令：

```
SECNUM,3
EREINF
ALLSEL,ALL
```

9.7.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 9-16 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

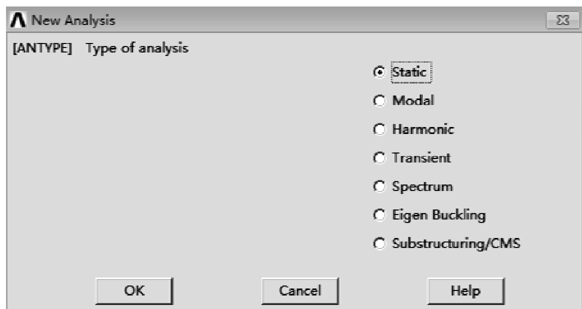


图 9-16　分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 9-17 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

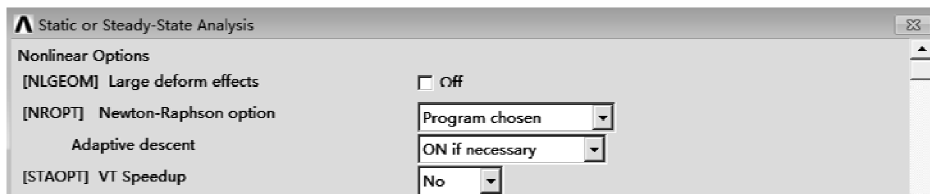


图 9-17 静态分析选项设置面板

2．定义边界条件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C. →On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L13、L6、L2、L7、L1、L3、L4、L5 和 L8，单击“OK”按钮。

3．定义载荷

（1）定义压力容器的内压

1）选择单元类型 1

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 9-18 所示，按照图 9-18 中所示进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

2）施加内压

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Elements，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出单元压力设置对话框，如图 9-19 所示，按照图 9-19 中所示进行输入，输入完毕，单击“OK”按钮。

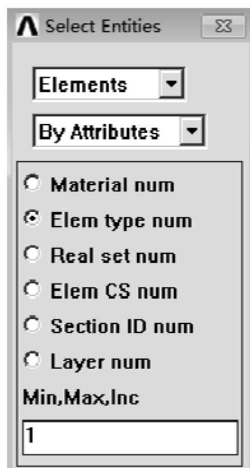


图 9-18 选择实体设置面板

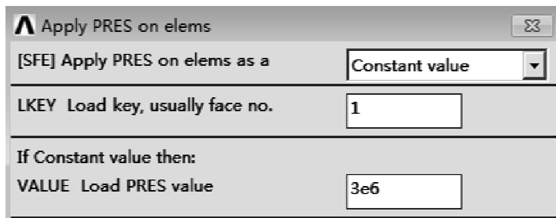


图 9-19 单元压力设置面板

（2）定义温度载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On

Elements，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出定义单元温度设置面板如图 9-20 所示，输入起始号（Starting location N）为 1，四个温度值都输入 1000，单击 Apply，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出定义单元温度设置面板，如图 9-20 所示，输入起始号为 5，四个温度值都输入 900，单击“Apply”按钮，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出图 9-20 所示的定义单元温度设置面板，输入起始号为 9，四个温度值都输入 800，单击“Apply”按钮，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出定义单元温度设置面板，如图 9-20 所示，输入起始号为 13，四个温度值都输入 700，单击“Apply”按钮，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出定义单元温度设置面板，如图 9-20 所示，输入起始号为 17，四个温度值都输入 600，单击“Apply”按钮，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出定义单元温度设置面板，如图 9-20 所示，输入起始号为 21，四个温度值都输入 500，单击“OK”按钮。



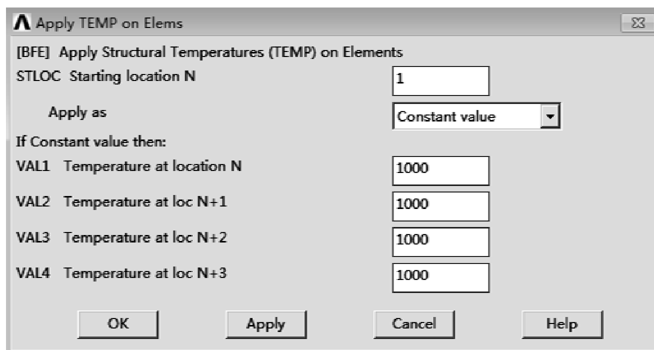


图 9-20 定义单元温度设置面板

（3）选择所有单元

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

4．定义载荷步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出计算结果输出控制面板，如图 9-21 所示，选择 Every substep，单击“OK”按钮。

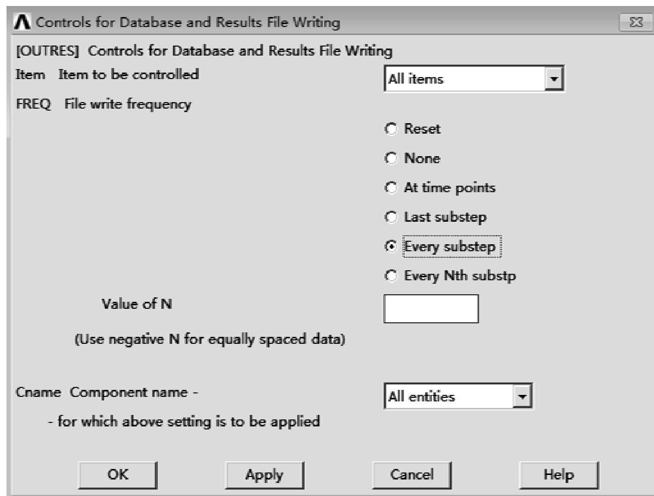


图 9-21 计算结果输出控制面板

5．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

9.7.3 后处理

图 9-22 给出了压力容器的平动位移云图，由图 9-22 可知，最大平位移为 0.00155m。图 9-23 给出了压力容器的转动位移云图，由图 9-23 可知，最大转动位移为 0.005258rad。图 9-24 给出了压力容器内胆的等效应力云图，由图 9-24 可知，最大等效应力为 151MPa，图 9-25 给出了强化纤维的等效应力云图，由图 9-26 可知，最大等效应力为 1.24GP。图 9-26 和图 9-27 分别给出了基体复合材料的第一层和第四层的等效应力云图，由图 9-26 和图 9-27 可知，第一层的最大等效应力为 201MPa，第四层的最大等效应力为 20.3MPa。图 9-28 给出了压力容器的最大应力失效云图，由图 9-28 可知最容易发生失效的位置为压力容器的进口过渡区，其失效系数为 0.256<1，因此结构是安全的。图 9-29 给出了压力容器的 Tsai-Wu 失效云图，由图 9-29 可知，最容易发生失效的位置为压力容器的进口过渡区，其失效系数为 0.240<1，因此结构是安全的。

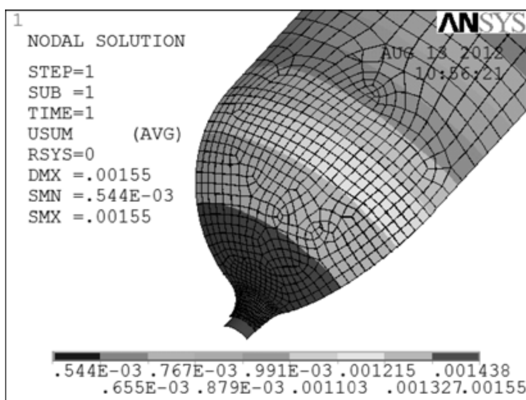


图 9-22　压力容器的平动位移云图

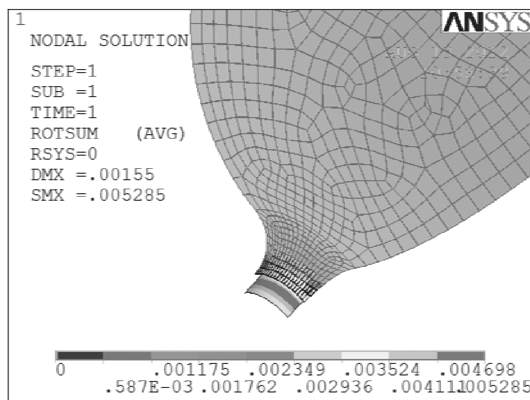


图 9-23　压力容器的转动位移云图

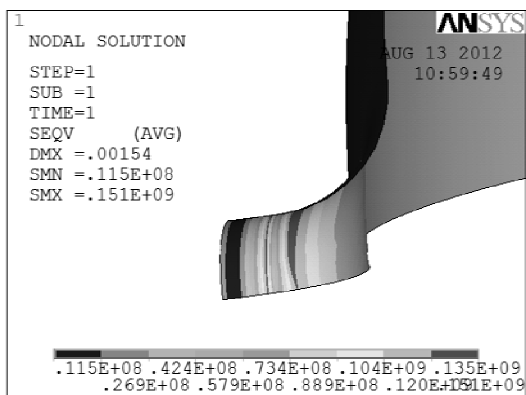


图 9-24　压力容器内胆的等效应力云图

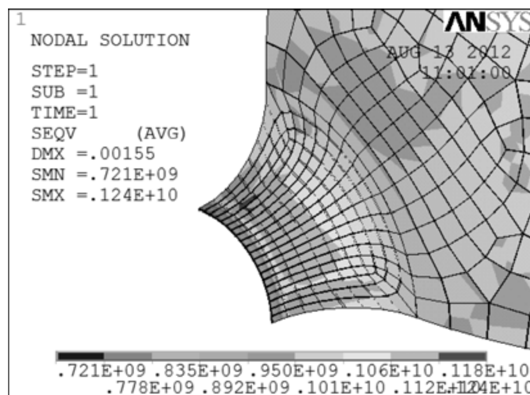


图 9-25　强化纤维的等效应力云图

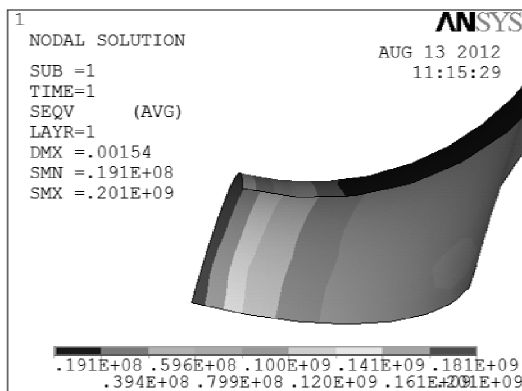


图 9-26　压力容器基体复合材料的第一层的等效应力

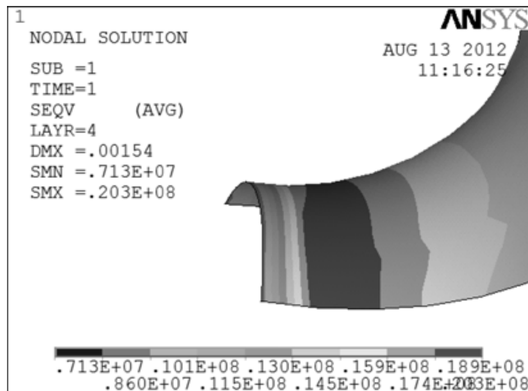


图 9-27　压力容器基体复合材料的第四层的等效应力

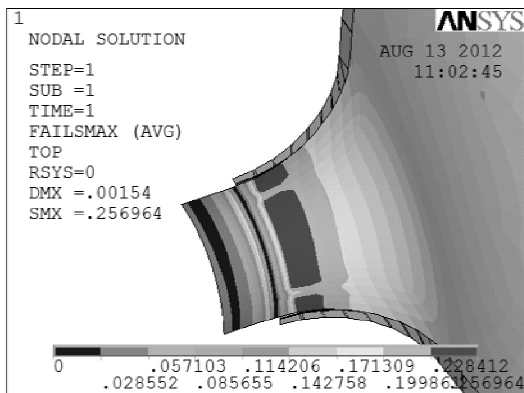


图 9-28　压力容器最大应力失效云图

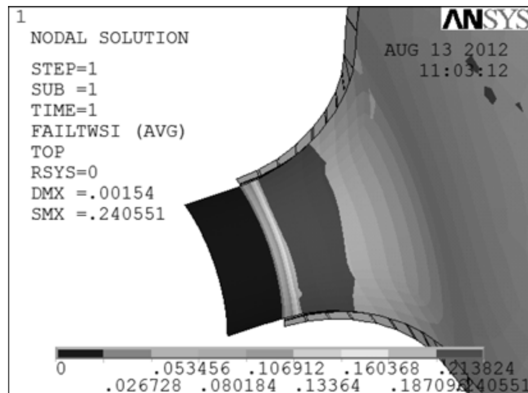


图 9-29　压力容器的 Tsai-Wu 失效云图

9.8　命令流

```
/FILNAME, ANALYSIS OF COMPOSITE PRESSURE VESSELS,0          !定义文件名
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
R1=0.015
R2=0.02
R3=0.1
R4=R1+R2+R3
L1=0.009
L2=0.25
ET,1,SHELL281    !定义单元
KEYOPT,1,8,2
!铝合金材料参数
MP,EX,1,72.0E9
```

```
MP,PRXY,1,0.29
MP,ALPX,1,5E-6
!均质基体材料参数
MP,EX,2,8.82E9
MP,PRXY,2,0.33
MP,ALPX,2,5E-6
!强化纤维材料参数
MP,EX,3,3.1E11
MP,ALPX,3,1E-6
!定义铝合金内胆的失效参数
FC,1,TEMP, ,     500,     900
FC,1,S,XTEN, 700E6, 490E6
FC,1,S,XCMP,-700E6,-490E6
FC,1,S,YTEN, 700E6, 490E6
FC,1,S,YCMP,-700E6,-490E6
FC,1,S,ZTEN, 700E6, 490E6
FC,1,S,ZCMP,-700E6,-490E6
FC,1,S,XY   , 455E6, 255E6
FC,1,S,YZ   , 455E6, 255E6
FC,1,S,XZ   , 455E6, 255E6
!定义基体的失效参数
FC,2,TEMP,,      500,     900
FC,2,S,XTEN, 120E6,   90E6
FC,2,S,XCMP,-240E6,-150E6
FC,2,S,YTEN, 120E6,   90E6
FC,2,S,YCMP,-240E6,-150E6
FC,2,S,ZTEN, 120E6,   90E6
FC,2,S,ZCMP,-240E6,-150E6
FC,2,S,XY   , 455E6 ,255E6
FC,2,S,YZ   , 455E6 ,255E6
FC,2,S,XZ   , 455E6 ,255E6
!定义强化纤维的失效参数
FC,3,TEMP,,        500,     900
FC,3,S,XTEN, 1900E6,1650E6
FC,3,S,XCMP,-1080E6,-800E6
FC,3,S,YTEN,     40E6,   30E6
FC,3,S,YCMP, -222E6,-111E6
FC,3,S,ZTEN,     40E6,   30E6
FC,3,S,ZCMP, -222E6,-111E6
FC,3,S,XY    ,    455E6, 255E6
FC,3,S,YZ    ,    455E6, 255E6
FC,3,S,XZ    ,    455E6, 255E6
!定义铝合金内胆截面
SECTYPE,1,SHELL
SECDATA,1.9E-3,1,,5
SECOFFSET,BOT
```



```
!定义均质基体截面
SECTYPE,2,SHELL
SECDATA,1.9E-3,1,,5
SECDATA,0.1E-3,2,,5
SECDATA,0.1E-3,2,,5
SECDATA,0.1E-3,2,,5
SECDATA,0.1E-3,2,,5
SECOFFSET,BOT
!定义强化纤维截面
SECTYPE,3,REINF,SMEAR
SECDATA,3,0.5E-4,1.0,, 45,LAYN,2
SECDATA,3,0.5E-4,1.0,,-45,LAYN,3
SECDATA,3,0.5E-4,1.0,, 45,LAYN,4
SECDATA,3,0.5E-4,1.0,,-45,LAYN,5
!定义关键点
K,1,R1,0,L1+R2+R3+L2
K,2,R1,0,R2+R3+L2
K,3,R1,0,R3+L2
K,4,R1+R2,0,R3+L2
K,5,R1+R2+R3,0,L2+R3
K,6,R4,0,L2
K,7,R4,0,0
K,8,0,0,0
K,9,0,0,L1+R2+R3+L2
!定义线
L,1,2
L,2,3
L,3,4
L,4,5
L,5,6
L,6,7
!定义线圆角
LFILLT,2,3,R2, ,
LFILLT,4,5,R3, ,
!由线旋转成面
FLST,2,4,4,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,6
FITEM,2,-7
FLST,8,2,3
FITEM,8,8
FITEM,8,9
AROTAT,P51X, , , , , ,P51X, ,-90, ,
!划分网格尺寸
TYPE,1 !设置网格单元类型为 1
```

```
SECNUM,1 !设置单元截面为 1
ESIZE,0.0012 !设置总体网格尺寸
AMESH,1 !划分面 1
ESIZE,0.004 !设置总体网格尺寸
SECNUM,2 !设置壳体截面号 2
AMESH,2 !划分面 2
ESIZE,0.008 !设置总体网格尺寸
AMESH,3
ESIZE,0.016
AMESH,4
!创建基体上的强化纤维
ESEL,S,SEC,,2 !选择截面号为 2 的单元
SECNUM,3
EREINF !生成强化纤维单元
ALLSEL,ALL
/SOL
ANTYPE,0 !激活静力学求解
NLGEOM,ON !激活大变形
!定义边界条件
DL,       13, ,SYMM
DL,        6, ,SYMM
DL,        2, ,SYMM
DL,        7, ,SYMM
DL,        1, ,SYMM
DL,        3, ,SYMM
DL,        4, ,SYMM
DL,        5, ,SYMM
DL,        8, ,SYMM
!定义载荷
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,1
EPLOT
SFE,ALL,PRES, ,3E6, , ,
ALLSEL,ALL
ESEL,S,SEC,,2
BFE,ALL,TEMP,1,1000,1000,1000,1000        !热载荷
BFE,ALL,TEMP,5,900,900,900,900
BFE,ALL,TEMP,9,800,800,800,800
BFE,ALL,TEMP,13,700,700,700,700
BFE,ALL,TEMP,17,600,600,600,600
BFE,ALL,TEMP,21,500,500,500,500
ALLSEL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
SOLVE
FINISH
```



第 10 章　梁结构的有限元分析

10.1　引言

梁结构是工程中一种较为常见的结构，尤其在道路桥梁、建筑设计中更是很常见。随着材料科学和桥梁施工工艺的发展，现代桥梁结构向大跨径、轻型化和柔性化方向发展，这就需要对桥梁结构的各种力学性能进行计算与分析，如静力特性、强度、刚度与变形等。梁框架结构作为建筑工程中常用的结构，在现代建筑结构中得到了广泛的使用。随着计算机技术和计算方法的发展，可以用数值分析的方法进行此类问题的计算。ANSYS 对于梁结构分析提供了两种梁单元，即 BEAM188 和 BEAM189，这两种单元对常见的梁结构分析，在计算效率和精度上都没有任何问题。

10.2　几何模型

如图 10-1 给出了梁框架模型简图，横向截面为正方形，几何尺寸如下：H_1=1.6m，H_2=1.5m，L=1.8m，W=1/2L。所有梁的横截面都为中空方形梁，其厚度为 9mm，宽度为 100mm。

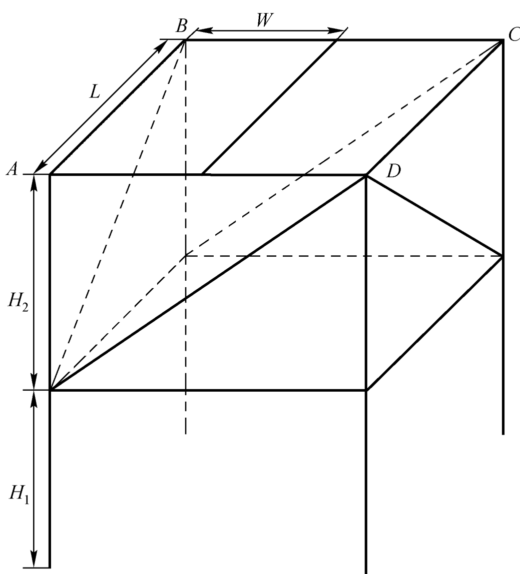


图 10-1　梁框架模型简图

10.3 材料的本构模型

本实例假设梁的应力-应变关系符合双线性等效强化模型，其中弹性模量为 210GPa、泊松比为 0.3、屈服应力为 350MPa、切线模量为 2.1GPa。

10.4 单元的选择

本实例选用 2 节点 BEAM188 单元模拟梁框架结构，并设置单元行为为三次多项式，应力输出为同时考虑扭矩和剪切力。

10.5 边界条件与载荷

梁框架结构底面的四个位置约束三个方向的平动和三个方向的转动自由度，在梁框架的顶面的 *AB* 施加一个侧向压力，大小为 6E3N/m，在 *ABCD* 平面施加 9E4N/m 竖直向下的压力。

10.6 GUI 操作

10.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 analysis of the beam frame structure，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入 H1=1.6，H2=1.5，L=1.8，W=1/2*L，PS=9E4，PH=6E3。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Beam，然后在右边选择 2 node 188 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 BEAM188。然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置单元行为（Element behavior）为三次行为（Cubic Form）；剪应力输出（Shear stress output）为包括所有（Include Both），单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮，关闭对话框。

4．定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，输入 EX=2.1E11、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框。继续单击 Structural→Nonlinear→

Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，在弹出的双线性等向强化模型定义面板中，输入 Yield=3.5E8、Tang Mod=2.1E9，单击“OK”按钮，选择 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

5. 定义梁截面

GUI：Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections，弹出梁截面设置面板，如图 10-2 所示，按照图 10-2 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

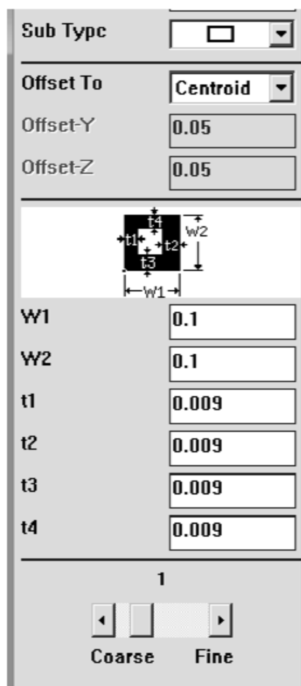


图 10-2 梁截面设置面板

6. 建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出激活坐标系中定义关键点面板，如图 10-3 所示，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=0、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2，X=L、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=L、Y=0、Z=L，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X=0、Y=0、Z=L，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X=0、Y=H1、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6，X=L、Y=H1、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7，X=L、Y=H1、Z=L，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 8，X=0、Y=H1、Z=L，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 9，X=0、Y=H1+H2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 10，X=W、Y=H1+H2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 11，X=L、Y=H1+H2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 12，X=L、Y=H1+H2、Z=L，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 13，X=W、Y=H1+H2、Z=L，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 14，X=0、Y=H1+H2、Z=L，单击“OK”按钮。

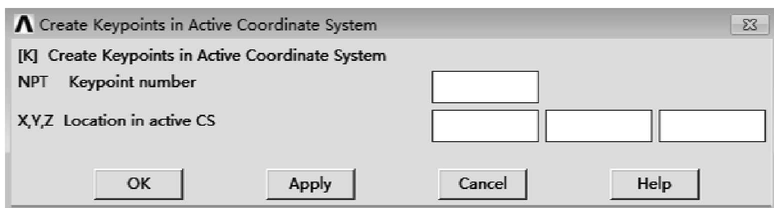


图 10-3 定义关键点面板

（2）定义线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 1 和 5，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 2 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 3 和 7，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 4 和 8，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 5 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 6 和 7，单击

“Apply”按钮；继续拾取关键点 7 和 8，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 8 和 5，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 11 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 12 和 7，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 9 和 5，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 14 和 8，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 14 和 13，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 13 和 12，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 12 和 11，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 10 和 11，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 9 和 10，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 9 和 14，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 13 和 10，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 8 和 12，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 12 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 8 和 9，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 5 和 11，单击“OK”按钮。

7．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击“设置”（Set）按钮，如图 10-4 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 10-5 所示。

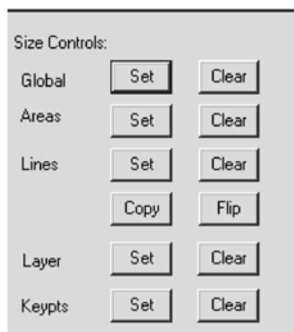


图 10-4　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

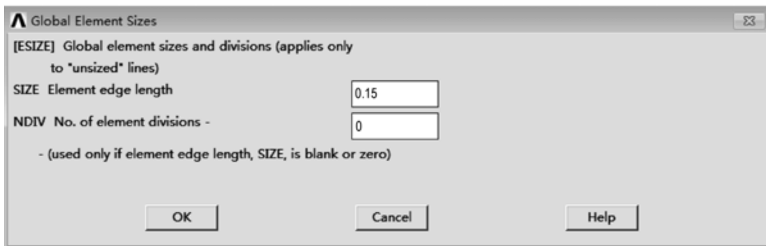


图 10-5　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.15，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

10.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 10-6 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静

态分析选项设置面板，如图 10-7 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

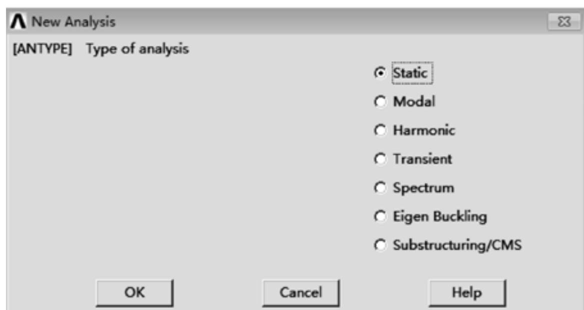


图 10-6　分析类型设置面板

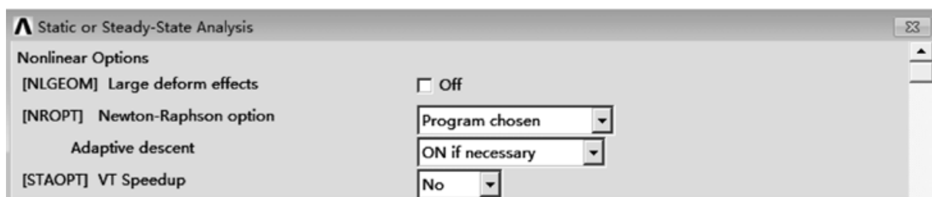


图 10-7　静态分析选项设置面板

2．定义边界条件

（1）选择底面所有的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 10-8 所示，按照图 10-8 进行设置，单击“OK”按钮。

（2）约束底面节点的六个方向的自由度

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 10-9 所示，选择约束类型（DOFs to be constrained）为 All DOF，单击“OK”按钮。



图 10-8　选择实体设置面板

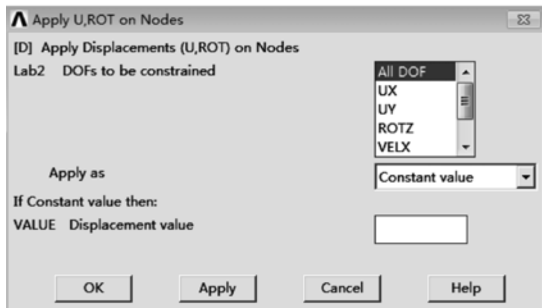


图 10-9　约束节点自由度设置面板

（3）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

3．定义载荷

（1）定义顶面竖向压力

1）选择顶面所有的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 10-10 所示，按照图 10-10 进行设置，单击“OK”按钮。

2）选择依附于节点的单元

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 10-11 所示，按照图 10-11 进行设置，单击“OK”按钮。



图 10-10　选择实体设置面板

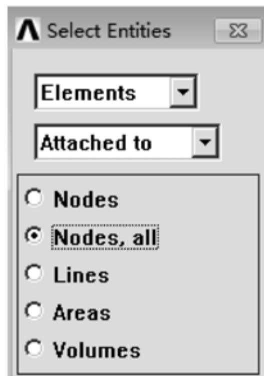


图 10-11　选择实体设置面板

3）施加梁压力

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Beams，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出梁单元压力设置面板，如图 10-12 所示，按照图 10-12 进行设置。设置完毕，单击“OK”按钮。

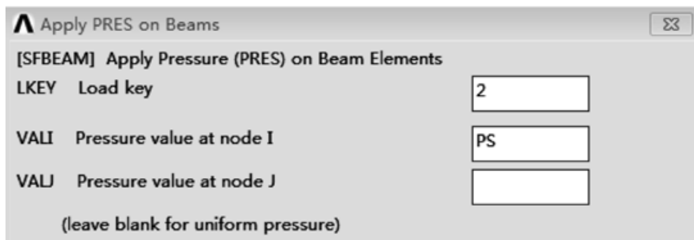


图 10-12　梁单元压力设置面板

4）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

（2）施加侧向压力

1）选择侧面所有的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 10-13 所示，按照图 10-13 进行设置，单击“OK”按钮。

2）选择 *AB* 线上的节点

GUI：Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 10-14 所示，按照图 10-14 进行设置，单击“OK”按钮。

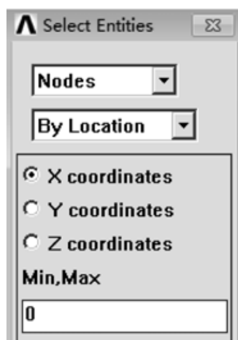


图 10-13 选择实体设置面板



图 10-14 选择实体设置面板

3）选择 *AB* 线上的梁单元

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出如图 10-11 所示的选择实体设置面板，按照图 10-11 进行设置，单击“OK”按钮。

4）施加梁压力

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Beams，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出梁单元压力设置面板，如图 10-15 所示，按照图 10-15 进行设置。设置完毕，单击“OK”按钮。

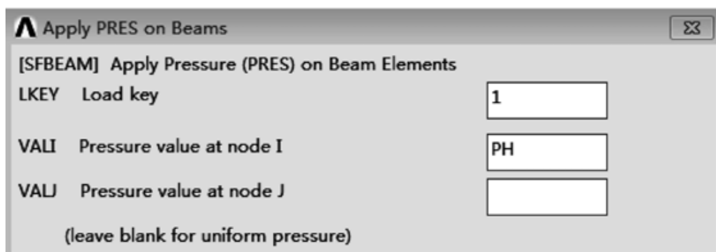


图 10-15 梁单元压力设置面板

5）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

4．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 10-16 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 100，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时



间步（ON），其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

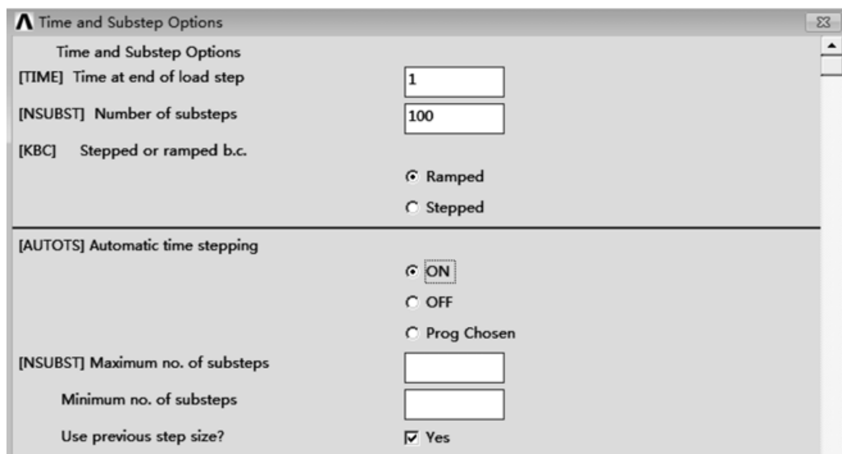


图 10-16　时间和子步选项设置面板

5．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

10.6.3 后处理

图 10-17 给出了求解完毕后的等效应力云图，由图 10-17 可知最大等效应力为 379MPa；图 10-18 给出了求解完毕后的等效塑性应变，由图 10-18 可知最大等效塑性应变为 0.021911；图 10-19 给出了求解完毕后的平动位移云图，由图 10-19 可知最大平动位移为 0.021911m；图 10-20 给出了求解完毕后的转动位移云图，由图 10-20 可知最大转动位移为 0.019438rad；图 10-21 给出了 MY 弯矩的云图，由图 10-21 可知最大 MY 弯矩发生在单元 123 处最大值为 16718.9N・m；图 10-22 给出了 MZ 弯矩的云图，由图 10-22 可知最大 MZ 弯矩发生在单元 139 处，最大值为 38693.2N・m。

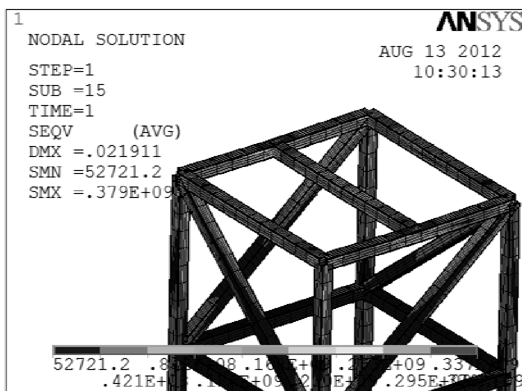


图 10-17　等效应力云图

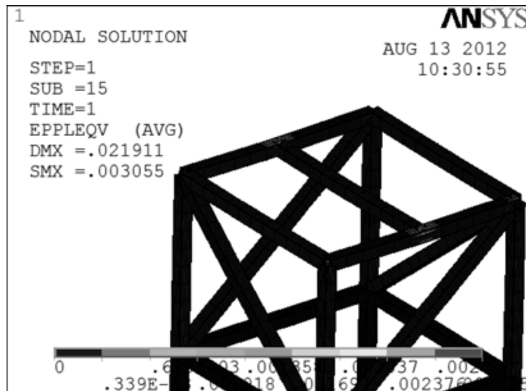


图 10-18　等效塑性应变云图

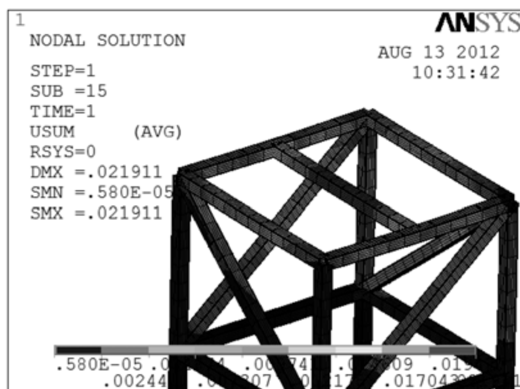


图 10-19 平动位移云图

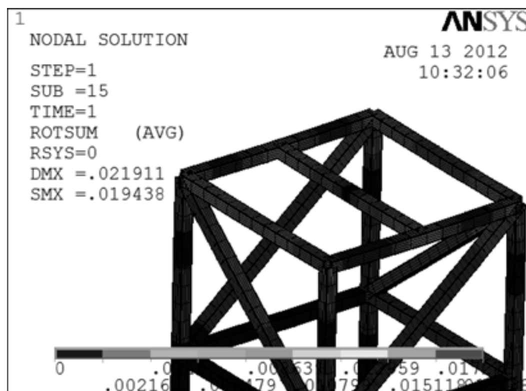


图 10-20 转动位移云图

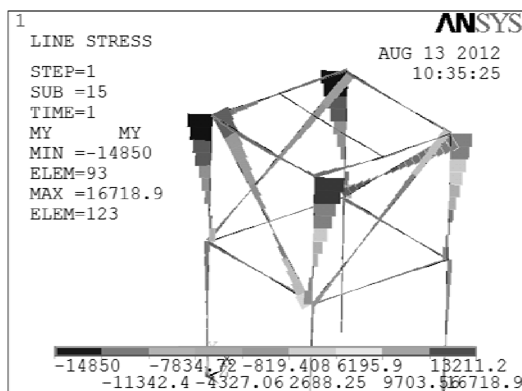


图 10-21 MY 弯矩的云图

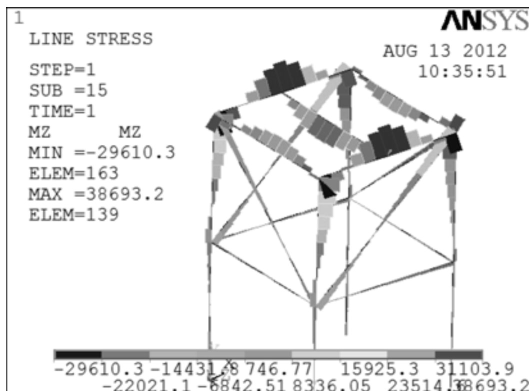


图 10-22 MZ 弯矩的云图

10.7 命令流

```
/FILNAME, ANALYSIS OF THE BEAM FRAME STRUCTURE,0          !定义文件名
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
H1=1.6
H2=1.5
L=1.8
W=1/2*L
PS=9E4
PH=6E3
ET,1,BEAM188 !定义单元
KEYOPT,1,3,3
KEYOPT,1,4,2
!定义梁截面
SECTYPE, 1, BEAM, HREC, ,1
```

```
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.1,0.1,0.009,0.009,0.009,0.009,0,0,0,0,0,0
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,2.1E11      !定义弹性模量
MPDATA,PRXY,1,,0.3      !定义泊松比
TB,BISO,1,1,2,    !设置梁的材料模型为双线性等向强化模型
TBTEMP,0
TBDATA,,350E6,2.1E9,,,,
!定义关键点
K,1,0,0,0
K,2,L,0,0
K,3,L,0,L
K,4,0,0,L
K,5,0,H1,0
K,6,L,H1,0
K,7,L,H1,L
K,8,0,H1,L
K,9,0,H1+H2,0
K,10,W,H1+H2,0
K,11,L,H1+H2,0
K,12,L,H1+H2,L
K,13,W,H1+H2,L
K,14,0,H1+H2,L
!定义线
L,        1,        5
L,        2,        6
L,        3,        7
L,        4,        8
L,        5,        6
L,        6,        7
L,        7,        8
L,        8,        5
L,       11,        6
L,       12,        7
L,        9,        5
L,       14,        8
L,       14,       13
L,       13,       12
L,       12,       11
L,       10,       11
L,      9,       10
L,        9,       14
L,       13,       10
L,        8,       12
L,       12,        6
```



```
L,        8,        9
L,        5,        11
!划分网格
ESIZE,0.15   !定义网格尺寸
LMESH,ALL !划分所有的线
!进入求解器
/SOL
ANTYPE,0     !激活静力学分析
NLGEOM,1   !激活大变形分析
!定义边界条件
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
NPLOT
D,ALL, , , , , ,ALL, , , , ,
ALLSEL,ALL
!定义载荷
EPLOT
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,H1+H2
NPLOT
ESEL,ALL
ESLN,S,1
EPLOT
SFBEAM,ALL,2,PRES,PS, , , , , ,0
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,H1+H2
ESEL,ALL
ESLN,S,1
EPLOT
SFBEAM,ALL,1,PRES,PH, , , , , ,0
ALLSEL,ALL
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,1
AUTOTS,1
NSUBST,100, , ,1
KBC,0
SOLVE
```



第 11 章　热障涂层的热应力分析

11.1　引言

随着航空航天技术的发展，热端部件的使用温度要求越来越高，已达到高温合金及单晶材料的极限状况，以燃气轮机的受热部件如喷嘴、叶片和燃烧室为例，它们处于高温氧化和高速气流冲蚀等恶劣环境中，承受温度达 11000℃，已超过镍合金使用的极限温度，因此必须采取相应措施。

热障涂层（Thermal Barrier Coating，TBC）又称为隔热涂层，是一种起到隔热作用的功能涂层，通常采用导热系数相对很低的材料，用合适的技术涂覆于高温工作的部件表面，从而避免高温工作介质直接作用在金属基体表面，以良好的隔热性能降低部件表面的温度，成为高温介质加热金属基体表面的屏障，起到削弱热交换的作用，可以对基体形成有效的保护。热障涂层的力学模型现阶段主要包括：陶瓷层、粘结层和基体层的三层模型，陶瓷层、热生长层、粘结层和基体的四层模型以及功能梯度层模型。随着计算机技术和数值仿真技术的飞速发展，在前期大量实验数据的基础之上，对热障涂层的隔热性能进行数值分析可取得较为准确的结果，并可取代部分实验。本章实例详细介绍了用 ANSYS 进行热障涂层分析的步骤和方法。

11.2　几何模型

如图 11-1 给出了三层热障涂层应力模型简图，该热障涂层系统由基体、粘结层和陶瓷层组成的 1/4 平面应变模型。几何尺寸如下：基体的内半径 R_1=2mm，基体的厚度 H_1=2mm，粘结层的厚度为 H_2=0.1mm，陶瓷层的厚度为 H_3=0.25mm。

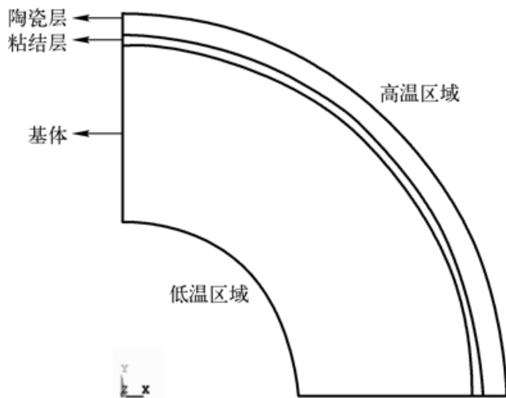


图 11-1　热障涂层力学模型简图

11.3 材料的本构模型



11.3.1 陶瓷层的本构关系

在热循环过程中，假设 TBC 系统中陶瓷层发生蠕变，各层材料的参数 E、υ、α 都随温度变化。在高温环境下蠕变的本构方程式为

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A\sigma^{m} \qquad (11\text{-}1)$$

式中，$\dot{\varepsilon}$ 为应变率，A 为蠕变系数，σ 为 Mises 等效应力，m 为蠕变指数。

TBC 系统相应的环向和径向应变分别由三部分组成，即弹性应变、热应变和高温蠕变应变。在 ANSYS 中输入应变硬化方程模拟（式（11-1））时

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = C_1\sigma^{C_2}\varepsilon_{cr}^{C_3}\mathrm{e}^{-C_4/T} \qquad (11\text{-}2)$$

为了让式（11-2）满足式（11-1），式中 C_1=A，$C_2=m$，$C_3=C_4$=0。计算参数的具体取值见表 11-1。

表 11-1　各层材料弹性模量与温度的关系

	温度/℃	弹性模量/GPa	泊　松　比	热膨胀系数/℃	导热系数 /W(m • ℃)$^{-1}$	屈服应力	切线模量/GPa
基底	20	220	0.31	1.48E-5	88	450MPa	2.2
	200	210	0.32	1.52 E-5	73.3		
	400	190	0.33	1.56 E-5	59.5		
	600	170	0.33	1.62 E-5	62.0		
	800	155	0.34	1.69 E-5	65.0		
	1000	130	0.35	1.75 E-5	68.1		
	1100	120	0.35	1.80 E-5	69.0		
粘结层	20	200	0.30	1.36 E-5	5.8	550MPa	1.5
	200	190	0.30	1.42 E-5	7.5		
	400	175	0.31	1.46 E-5	9.5		
	600	160	0.31	1.52 E-5	12		
	800	145	0.32	1.61 E-5	14.5		
	1000	120	0.33	1.72	16.2		
	1100	110	0.33	1.76	17.0		
陶瓷	20	200	0.10	0.9	1.956	A	m
	200	190	0.10	0.92	1.834	9.3E-15	0.48
	400	175	0.10	0.96	1.736		
	600	160	0.11	1.01	1.627		
	800	145	0.11	1.08	1.634		
	1000	120	0.12	1.17	1.681		
	1100	110	0.12	1.22	1.700		

11.3.2 粘结层和基体本构关系

本章实例假设粘结层和基体的应力-应变关系为双线性随动强化模型，其屈服强度和切线模量以及其他计算参数如表 11-1 所示。

11.4 单元的选择

本实例选用热-结构耦合单元 PLANE223 模拟热障涂层结构的力学响应，并设置单元行为为平面应变。

11.5 边界条件及载荷

温度边界条件为第一类边界条件，即在基体和陶瓷层的表面直接施加温度，并忽略热传导的时间，且陶瓷层表面的最高温度与基体表面的最高温度差为 350℃，热障涂层热载荷的循环方式如图 11-2 所示，其中实线为陶瓷表面的温度变化曲线，虚线为基体表面温度变化曲线。力学边界条件：对两个侧面施加对称约束边界条件。

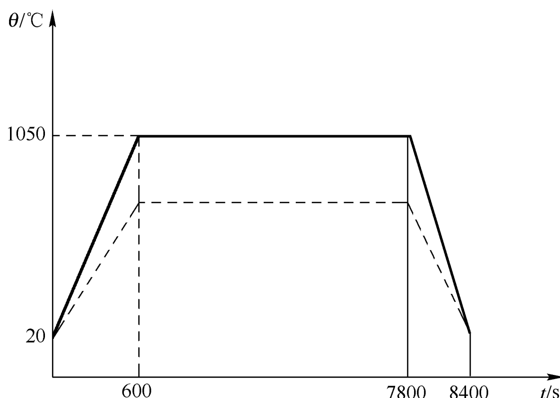


图 11-2　热障涂层热载荷示意图

11.6 GUI 操作

11.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 analysis of thermal barrier coatings，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入 R1=0.002，H1=0.002，H2=0.0001，H3=0.00025。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Coupled Field，然后在右边选择 Quad 8node 223 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 BEAM188。然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置分析类型（Analysis）为热-结构分析（Structural-thermal）；单元行为为平面应变（Plane strain），单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

4．定义材料模型

（1）定义基体和粘结层的材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 11-3 所示，单击 7 次“添加温度”（Add Temperature）按钮，按照图 11-3 输入 7 个温度点和对应的弹性模量与泊松比，单击“OK”按钮，关闭对话框。继续单击 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic，弹出材料的热膨胀系数定义面板，如图 11-4 所示，单击 7 次“添加温度”（Add Temperature）按钮，按照图 11-4 输入 7 个温度点和对应的热膨胀系数，单击“OK”按钮，选择 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

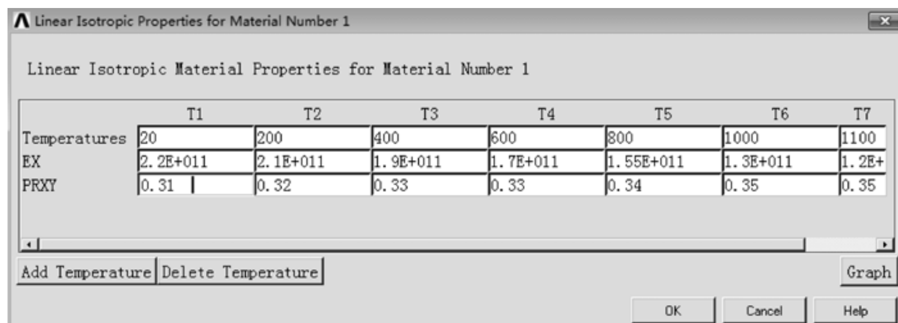


图 11-3　各向同性线弹性材料定义面板

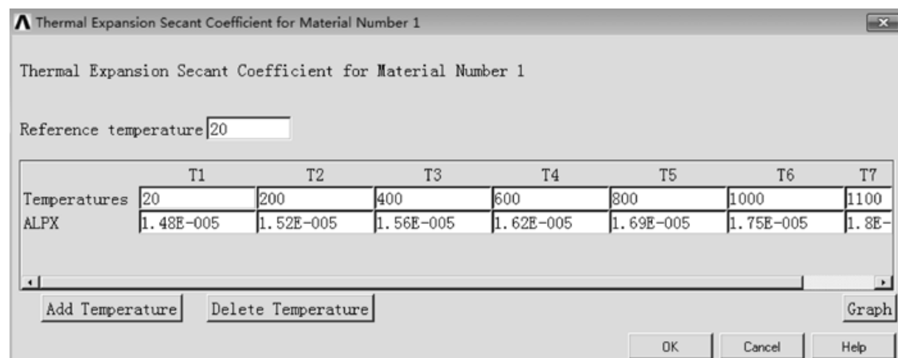


图 11-4　材料的热膨胀系数定义面板

继续单击 Structural→Nonlinear→Rate Independent→Kinematic Hardning Plasticty→Mises Plasticity→Bilinear，弹出双线性随动强化材料模型定义面板，如图 11-5 所示，设置应力-应变选项为 Rice's Hard Rule，输入屈服应力为 4.5E8、切线模量为 2E9，单击“OK”按钮；继续单击 Thermal→Conductivity→Isotropic，弹出热传导系数定义面板，如图 11-6 所示，单击 7 次“添加温度”（Add Temperature）按钮，按照图 11-6 所示输入 7 个温度点和对应的热传导系数，单击“OK”按钮。

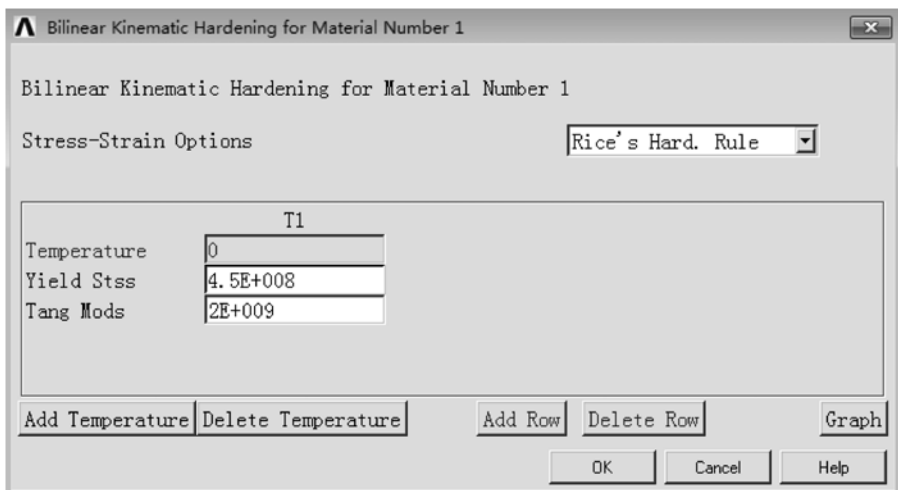


图 11-5　双线随动强化材料模型定义面板

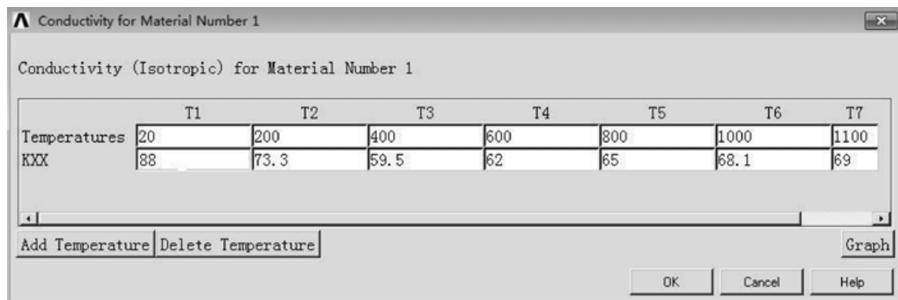


图 11-6　热传导系数定义面板

粘结层的材料模型定义方法与基体材料模型的定义方法相同，具体操作可参见本章的视频教程。

（2）定义陶瓷的材料模型

陶瓷的材料模型中弹性模量、泊松比、热膨胀系数、导热系数定义方法与基体和粘结层材料定义方法相同。下面详细介绍定义蠕变模型的方法。单击 Structural→Nonlinear→Rate Dependent→Creep→Creep only→Mises Potential→Implicit→10:Norton(Secondary)，弹出材料的蠕变模型定义面板，如图 11-7 所示，按照图 11-7 所示进行输入，输入完毕，单击“OK”按钮，如图 11-8 给出了所有材料模型输入完毕的材料模型定义面板，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

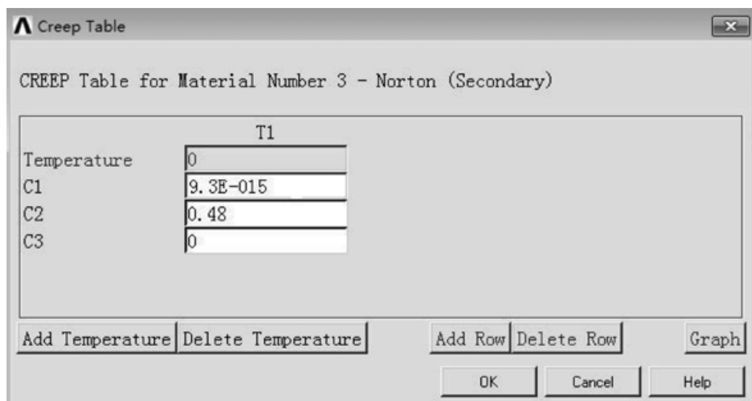


图 11-7 材料的蠕变模型定义面板

5. 建立模型

（1）定义 1/4 圆环

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus，弹出创建部分圆环的定义面板，如图 11-9 所示，输入 WPX=0、WPY=0、Rad-1=R1、Theta-1=0、Rad-2=R1+H1、Theta-2=90，单击“Apply”按钮；继续输入 WPX=0、WPY=0、Rad-1=H1+R1、Theta-1=0、Rad-2=R1+H1+H2、Theta-2=90，单击“Apply”按钮；继续输入 WPX=0、WPY=0、Rad-1=H1+R1+H2、Theta-1=0、Rad-2=R1+H1+H2+H3、Theta-2=90，单击“OK”按钮。

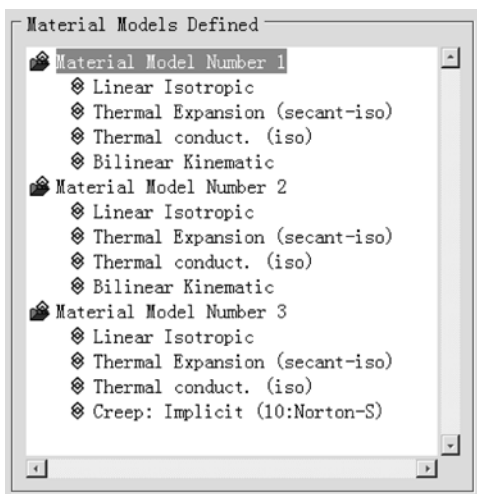


图 11-8 输入完毕后的材料模型定义面板

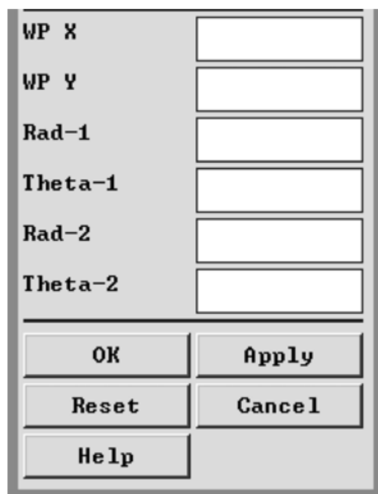


图 11-9 创建部分圆环的定义面板

（2）将所有 1/4 圆环粘结到一起

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

6. 网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）划分基体网格

1）设置网格划分属性

单击网格划分工具面板上的单元属性（Element Attributes）上的“设置”（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 11-10 所示，按照图 11-10 进行设置。

2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击“设置”（Set）按钮，如图 11-11 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 11-12 所示。

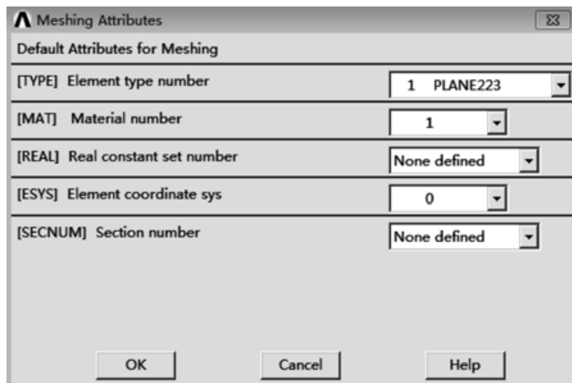


图 11-10 网格属性设置面板

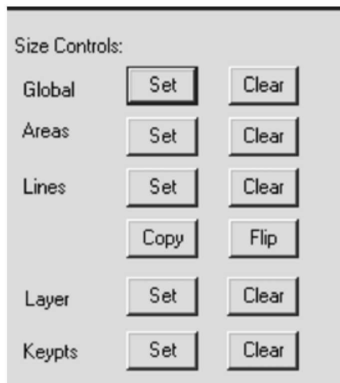


图 11-11 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

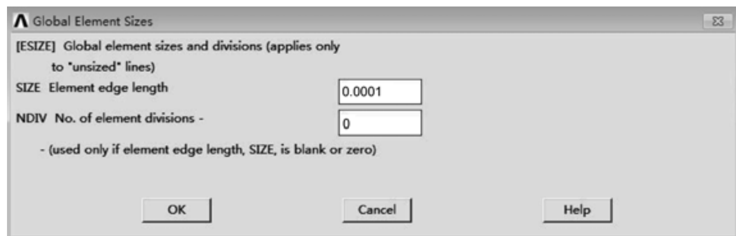


图 11-12 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.0001，单击“OK”按钮。

3）设置单元形状及划分方法

按照图 11-13 所示的单元形状和划分方法设置面板进行设置。

4）划分网格

单击网格划分工具面板上的“网格划分”（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取基体面，单击“OK”按钮。

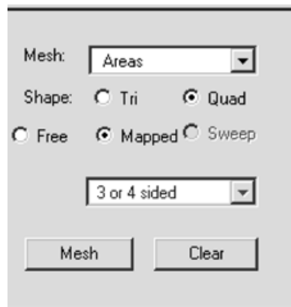


图 11-13 单元形状和划分方法设置面板

（3）划分粘结层网格

1）设置网格划分属性

单击网格划分工具面板上的单元属性（Element Attributes）上的“设置”（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 11-10 所示，将材料号设置为 2，其他按照图 11-10 进行设置。

2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击“设置”（Set）按钮，如图 11-11 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 11-12 所示。该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.00005，单击“OK”按钮。

3）划分网格

单击网格划分工具面板上的“网格划分”（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取粘结层面，单击“OK”按钮。

（4）划分陶瓷层网格

1）设置网格划分属性

单击网格划分工具面板上的单元属性（Element Attributes）上的“设置”（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 11-10 所示，将材料号设置为 3，其他按照图 11-10 进行设置。

2）设置总体网格尺寸

选择的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击“设置”（Set）按钮，如图 11-11 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 11-12 所示。该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.0001，单击“OK”按钮。

3）划分网格

单击网格划分工具面板上的“网格划分”（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取粘结层面，单击“OK”按钮。

11.6.2 求解

1. 设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 11-14 所示，选择瞬态动力学分析（Transient），单击“OK”按钮，弹出瞬态分析求解方法设置面板，选择完全法（Full），单击“OK”按钮。

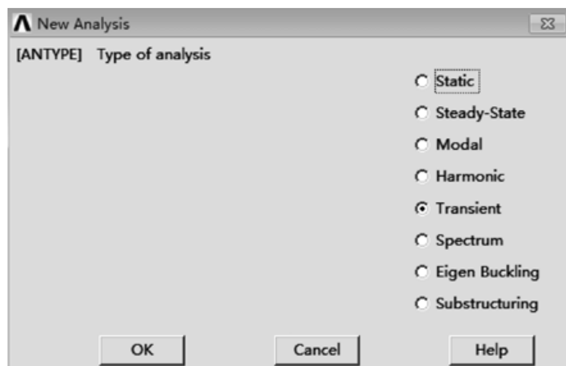


图 11-14 分析类型设置面板

（2）激活大变形分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Basic，弹出求解控制设置面板，如图 11-15 所示，设置分析选项为大变形瞬态分析（Large Displacement Transient），设置完毕，单击“OK”按钮。

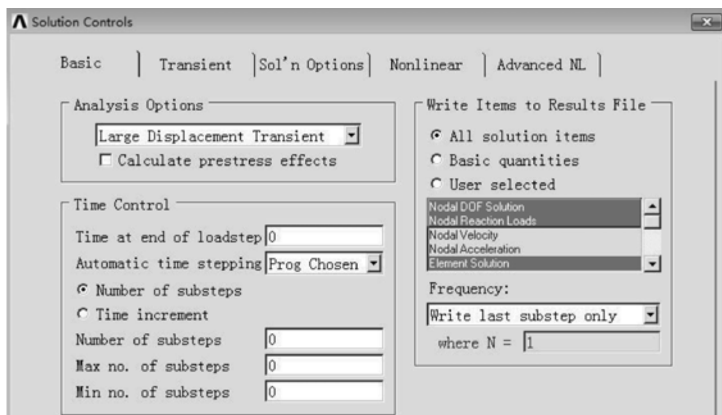


图 11-15　求解控制设置面板

2．定义边界条件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C. →On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L2、L14、L16、L4、L13 和 L15，单击“OK”按钮。

3．定义载荷

（1）定义函数

1）定义陶瓷层温度函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Functions→Define/Edit，弹出函数编辑器设置面板，如图 11-16 所示，按照图 11-16 进行设置。

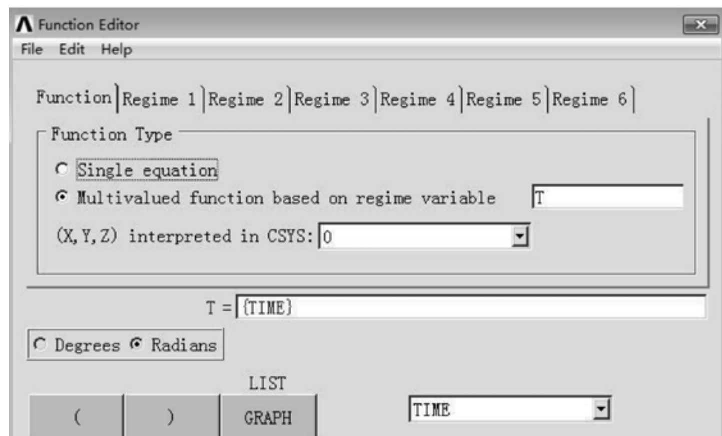


图 11-16　函数编辑器设置面板

单击“Regime1”按钮，弹出规则 1 设置面板，如图 11-17 所示，按照图 11-17 进行设置。

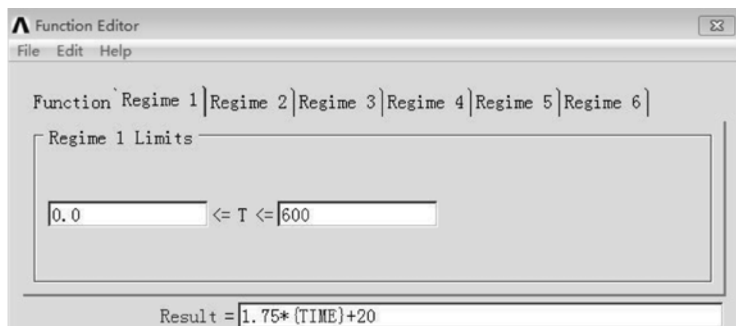


图 11-17 规则 1 设置面板

单击“Regime2”按钮，弹出规则 2 设置面板，如图 11-18 所示，按照图 11-18 进行设置。

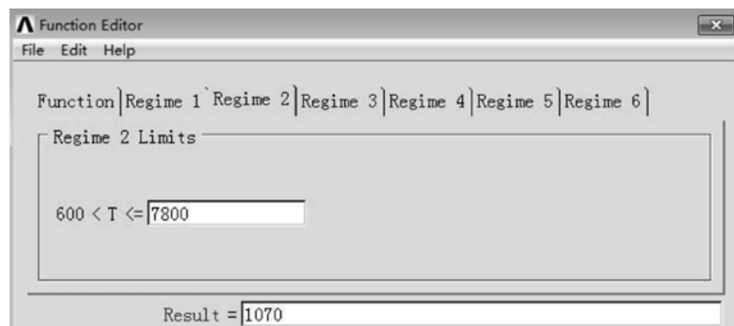


图 11-18 规则 2 设置面板

单击“Regime3”按钮，弹出规则 3 设置面板，如图 11-19 所示，按照图 11-19 进行设置。

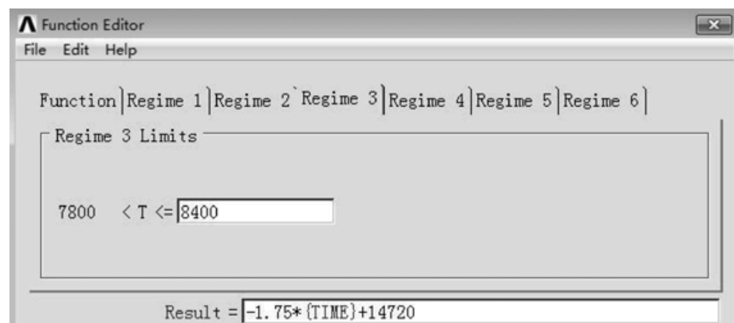


图 11-19 规则 3 设置面板

2）保存函数

单击函数边界器面板上的 File→Save，在弹出的对话框中，输入文件名 GW，单击“Save”按钮。

（2）定义基体温度函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Functions→Define/Edit.，弹出

函数编辑器设置面板，按照图 11-16 进行设置。单击“Regime1”按钮，弹出规则 1 设置面板，如图 11-20 所示，按照图 11-20 进行设置。

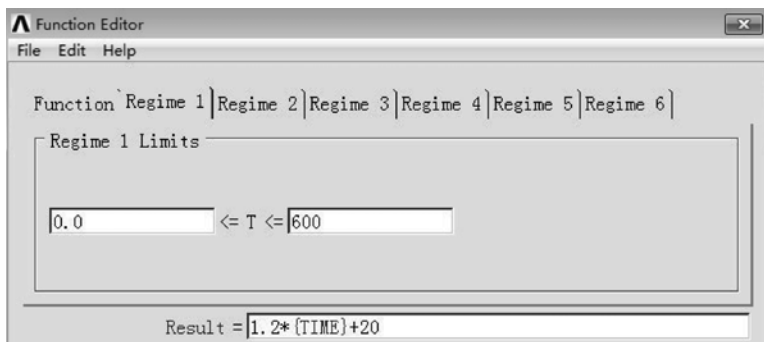


图 11-20　规则 1 设置面板

单击“Regime2”按钮，弹出规则 2 设置面板，如图 11-21 所示，按照图 11-21 进行设置。

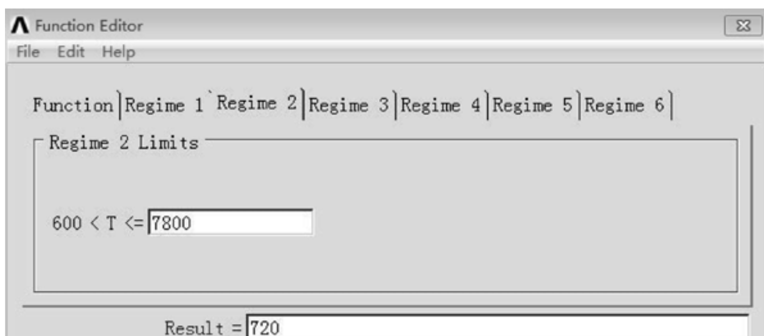


图 11-21　规则 2 设置面板

单击“Regime3”按钮，弹出规则 3 设置面板，如图 11-22 所示，按照图 11-22 进行设置。

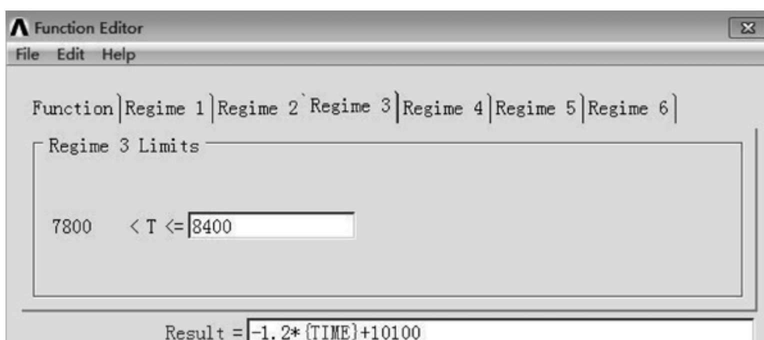


图 11-22　规则 3 设置面板

单击函数边界器面板上的 File→Save，在弹出的对话框中的文件名中输入 DW，单击“Save”按钮。

（3）读入函数

1）读入陶瓷层温度函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Functions→Read File，弹出打开文件对话框，选择 GW 文件，单击打开，弹出如图 11-23 所示的函数加载器设置面板，输入表格参数名为 GW，单击“OK”按钮。

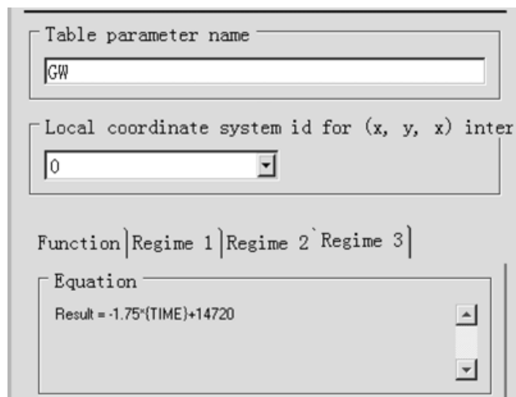


图 11-23 函数加载器设置面板

2）读入基体温度函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Functions→Read File，弹出打开文件对话框，选择 DW 文件，单击打开，弹出如图 11-23 所示的函数加载器设置面板，输入表格参数名为 DW，单击“OK”按钮。

（4）施加温度载荷

1）在陶瓷层表面施加温度载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L9，单击“OK”按钮，弹出图 11-24 所示的在线上施加温度设置面板，按照图 11-24 进行设置，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择 GW，单击“OK”按钮。

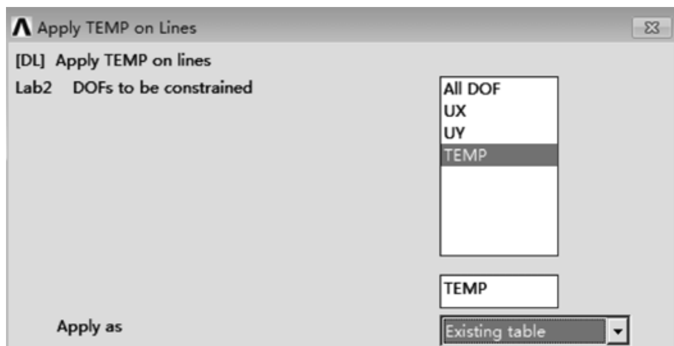


图 11-24 在线上施加温度设置面板

2）在基体表面施加温度载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L9，单击“OK”按钮，弹出在线上施加温度设置面板，如图 11-24 所示，按照图 11-24 进行设置，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中选择 DW，单击“OK”按钮。

4．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板，选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，在

弹出的时间和子步选项设置面板，计算时间（TIME）输入 8400，子步数量（Number of substeps）输入 150，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 300 和最小子步数（Minimum no. of substeps）为 100。

（3）激活应变率影响

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Strn Rate Effect，弹出蠕变选项设置面板，如图 11-25 所示，勾选应变率影响。

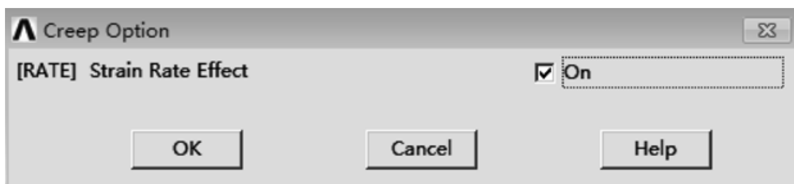


图 11-25　蠕变选项设置面板

5．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

11.6.3 后处理

图 11-26 给出了 588s 时刻的温度云图，由图 11-26 可知模型的陶瓷层外表面温度最高达到 1049℃；图 11-27 给出了 588s 时刻的径向温度与径向距离的关系图，由图 11-27 可知，陶瓷层的隔热效果显著，温度在陶瓷内迅速降低；图 11-28 和图 11-29 分别给出了陶瓷层表面和基体表面温度与时间的关系，由图 11-28 和图 11-29 可知内外层的温度与时间变化的规律，与预先定义载荷变化规律相同，因此可以证明本实例的加载方法正确；图 11-30 和图 11-31 分别给出了 588s 时刻和 7784s 时刻的等效蠕变云图，由图 11-30 和图 11-31 可知，等效蠕变随着时间的增加而增加；图 11-32 给出了残余等效应力云图，由图 11-32 可知最大残余应力为 546MPa；图 11-33 给出了残余等效塑性应变云图，由图 11-33 可知最大残余等效塑性应变为 0.00278。

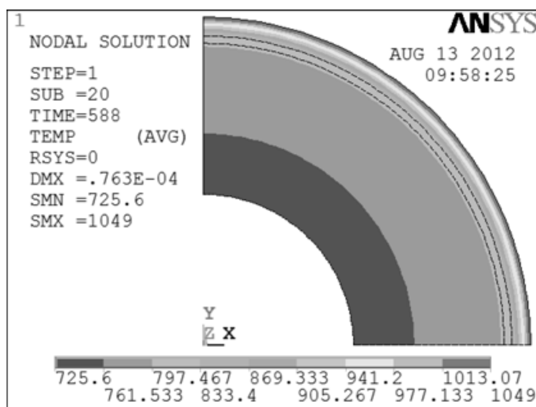


图 11-26　时间为 588s 时刻的温度云图

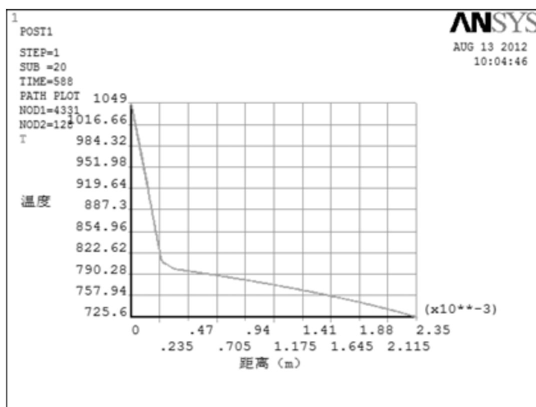


图 11-27　时间为 588s 时刻径向温度与径向距离的关系

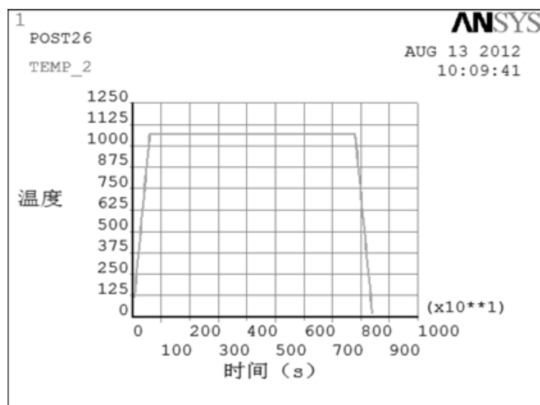


图 11-28　陶瓷层表面的温度与时间的关系

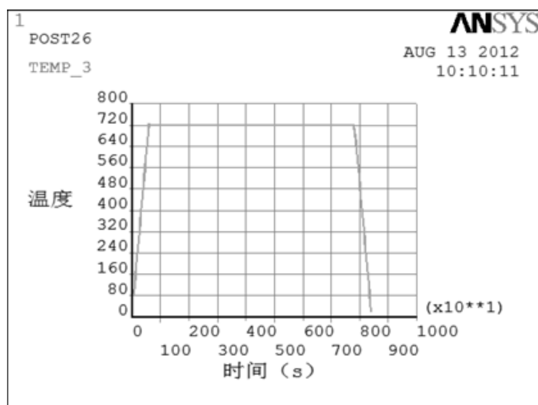


图 11-29　基体层外表面的温度与时间的关系

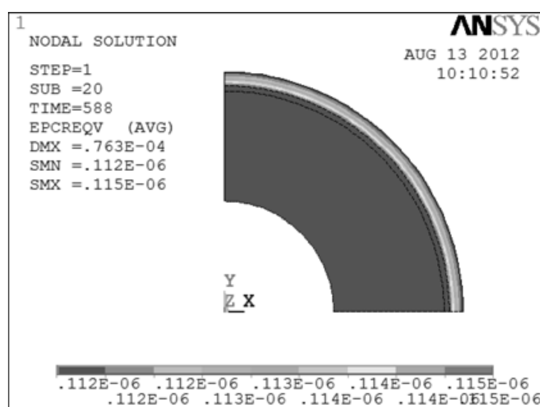


图 11-30　588s 时刻的等效蠕变云图

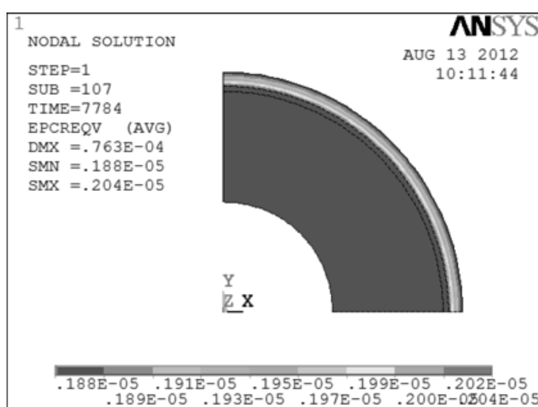


图 11-31　7784s 时刻的等效蠕变云图

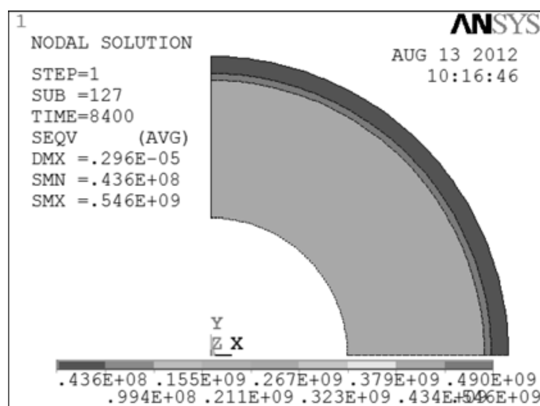


图 11-32　残余等效应力云图

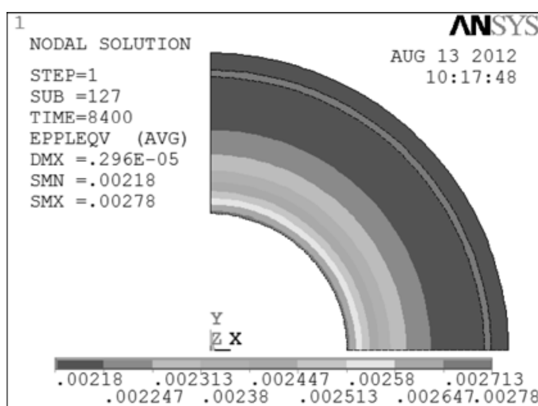


图 11-33　残余等效塑性应变云图

11.7 命令流

```
/FILNAME, ANALYSIS OF THERMAL BARRIER COATINGS,0          !定义文件名
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
R1=0.002
H1=0.002
H2=0.0001
H3=0.00025
ET,1,PLANE223              !定义单元
KEYOPT,1,1,11              !设置单元为热-结构分析
KEYOPT,1,3,2
!定义基体的材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,400
MPTEMP,4,600
MPTEMP,5,800
MPTEMP,6,1000
MPTEMP,7,1100
!定义随温度变化的弹性模量
MPDATA,EX,1,,220E9
MPDATA,EX,1,,210E9
MPDATA,EX,1,,190E9
MPDATA,EX,1,,170E9
MPDATA,EX,1,,155E9
MPDATA,EX,1,,130E9
MPDATA,EX,1,,120E9
MPDATA,PRXY,1,,0.31
MPDATA,PRXY,1,,0.32
MPDATA,PRXY,1,,0.33
MPDATA,PRXY,1,,0.33
MPDATA,PRXY,1,,0.34
MPDATA,PRXY,1,,0.35
MPDATA,PRXY,1,,0.35
!定义随温度变化的热膨胀系数
UIMP,1,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,1,,1.48E-5
MPDATA,ALPX,1,,1.52E-5
MPDATA,ALPX,1,,1.56E-5
MPDATA,ALPX,1,,1.62E-5
MPDATA,ALPX,1,,1.69E-5
MPDATA,ALPX,1,,1.75E-5
```

```
MPDATA,ALPX,1,,1.8E-5
!定义双线性随动强化
TB,BKIN,1,1,2,1
TBTEMP,0
TBDATA,,450E6,2E9,,,,
!定义随温度变化的导热系数
MPDATA,KXX,1,,88
MPDATA,KXX,1,,73.3
MPDATA,KXX,1,,59.5
MPDATA,KXX,1,,62
MPDATA,KXX,1,,65
MPDATA,KXX,1,,68.1
MPDATA,KXX,1,,69
!定义粘结层的材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,400
MPTEMP,4,600
MPTEMP,5,800
MPTEMP,6,1000
MPTEMP,7,1100
!定义随温度变化的粘结层的弹性模量
MPDATA,EX,2,,200E9
MPDATA,EX,2,,190E9
MPDATA,EX,2,,175E9
MPDATA,EX,2,,160E9
MPDATA,EX,2,,145E9
MPDATA,EX,2,,120E9
MPDATA,EX,2,,110E9
MPDATA,PRXY,2,,0.30
MPDATA,PRXY,2,,0.30
MPDATA,PRXY,2,,0.31
MPDATA,PRXY,2,,0.31
MPDATA,PRXY,2,,0.32
MPDATA,PRXY,2,,0.33
MPDATA,PRXY,2,,0.33
!定义随温度变化的粘结层的热膨胀系数
UIMP,2,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,2,,1.36E-5
MPDATA,ALPX,2,,1.42E-5
MPDATA,ALPX,2,,1.46E-5
MPDATA,ALPX,2,,1.52E-5
MPDATA,ALPX,2,,1.61E-5
MPDATA,ALPX,2,,1.72E-5
MPDATA,ALPX,2,,1.76E-5
```



```
!定义随温度变化的粘结层的导热系数
MPDATA,KXX,2,,5.8
MPDATA,KXX,2,,7.5
MPDATA,KXX,2,,9.5
MPDATA,KXX,2,,12
MPDATA,KXX,2,,14.5
MPDATA,KXX,2,,16.2
MPDATA,KXX,2,,17
!定义粘结层的双线性随动强化材料模型
TB,BKIN,2,1,2,1
TBTEMP,0
TBDATA,,550E6,1.5E9,,,,
!定义陶瓷的材料参数
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,400
MPTEMP,4,600
MPTEMP,5,800
MPTEMP,6,1000
MPTEMP,7,1100
!定义随温度变化的陶瓷层的弹性模量
MPDATA,EX,3,,200E9
MPDATA,EX,3,,190E9
MPDATA,EX,3,,175E9
MPDATA,EX,3,,160E9
MPDATA,EX,3,,145E9
MPDATA,EX,3,,120E9
MPDATA,EX,3,,110E9
MPDATA,PRXY,3,,0.10
MPDATA,PRXY,3,,0.10
MPDATA,PRXY,3,,0.10
MPDATA,PRXY,3,,0.11
MPDATA,PRXY,3,,0.11
MPDATA,PRXY,3,,0.12
MPDATA,PRXY,3,,0.12
!定义随温度变化的陶瓷层的热膨胀系数
UIMP,1,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,3,,0.9E-5
MPDATA,ALPX,3,,0.92E-5
MPDATA,ALPX,3,,0.96E-5
MPDATA,ALPX,3,,1.01E-5
MPDATA,ALPX,3,,1.08E-5
MPDATA,ALPX,3,,1.17E-5
MPDATA,ALPX,3,,1.22E-5
!定义随温度变化的陶瓷层的导热系数
```



```
MPDATA,KXX,3,,1.956
MPDATA,KXX,3,,1.834
MPDATA,KXX,3,,1.736
MPDATA,KXX,3,,1.627
MPDATA,KXX,3,,1.634
MPDATA,KXX,3,,1.681
MPDATA,KXX,3,,1.700
!定义随温度变化的陶瓷层的蠕变模型
TB,CREE,3,1,3,10
TBTEMP,0
TBDATA,,9.3E-15,0.48,0,,,
!建立模型
CYL4,0,0,R1,0,R1+H1,90
CYL4,0,0,H1+R1,0,H1+R1+H2,90
CYL4,0,0,H1+R1+H2,0,H1+R1+H2+H3,90
!将所有的面粘结
AGLUE,ALL
!开始划分网格
MAT,1 !设置单元的材料号为 1
ESIZE,0.0001,0, !设置总体网格尺寸
MSHKEY,1 !设置网格的划分方法为映射
AMESH,1 !划分面 1

MAT,2
ESIZE,0.00005,0,
AMESH,4

MAT,3
ESIZE,0.0001,0,
AMESH,5
!进入求解器
/SOL
ANTYPE,4      !激活瞬态动力学分析
NLGEOM,1    !激活大变形
TRNOPT,FULL    !采用完全法
!定义边界条件
DL,          2, ,SYMM
DL,         14, ,SYMM
DL,         16, ,SYMM
DL,          4, ,SYMM
DL,         13, ,SYMM
DL,         15, ,SYMM
!定义函数
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
```

```
*SET,_FNCNAME,'GW'
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,GW.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,5,4,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: {TIME}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, 99, 0, 1, 1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1),     0
! END OF EQUATION: {TIME}
!
! BEGIN OF EQUATION: 1.75*{TIME}+20
*SET,%_FNCNAME%(0,0,2), 600, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,2), 1.0, −1, 0, 1.75, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,2), 0.0, −2, 0, 1, −1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,2),     0, −1, 0, 20, 0, 0, −2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,2), 0.0, −3, 0, 1, −2, 1, −1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,2), 0.0, 99, 0, 1, −3, 0, 0
! END OF EQUATION: 1.75*{TIME}+20
!
! BEGIN OF EQUATION: 1070
*SET,%_FNCNAME%(0,0,3), 7800, −999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,3), 1.0, 99, 0, 1070, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,3),     0
*SET,%_FNCNAME%(0,5,3),     0
! END OF EQUATION: 1070
```



```
!
! BEGIN OF EQUATION: -1.75*{TIME}+14720
*SET,%_FNCNAME%(0,0,4), 8400, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,4), 1.0, -1, 0, -1.75, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,4), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,4),    0, -1, 0, 14720, 0, 0, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,4), 0.0, -3, 0, 1, -2, 1, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,4), 0.0, 99, 0, 1, -3, 0, 0
! END OF EQUATION: -1.75*{TIME}+14720
!-->
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'DW'
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,DW.FUNC,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,5,4,,,,%_FNCCSYS%
!
! BEGIN OF EQUATION: {TIME}
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, 99, 0, 1, 1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1),    0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),    0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1),    0
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1),    0
! END OF EQUATION: {TIME}
!
! BEGIN OF EQUATION: 1.2*{TIME}+20
*SET,%_FNCNAME%(0,0,2), 600, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,2), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,2), 1.0, -1, 0, 1.2, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,2), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 1
```

```
*SET,%_FNCNAME%(0,3,2),      0, -1, 0, 20, 0, 0, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,2), 0.0, -3, 0, 1, -2, 1, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,2), 0.0, 99, 0, 1, -3, 0, 0
! END OF EQUATION: 1.2*{TIME}+20
!
! BEGIN OF EQUATION: 720
*SET,%_FNCNAME%(0,0,3), 7800, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,3), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,3), 1.0, 99, 0, 720, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,3),      0
*SET,%_FNCNAME%(0,3,3),      0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,3),      0
*SET,%_FNCNAME%(0,5,3),      0
! END OF EQUATION: 720
!
! BEGIN OF EQUATION: -1.2*{TIME}+10100
*SET,%_FNCNAME%(0,0,4), 8400, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,4), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,4), 1.0, -1, 0, -1.2, 0, 0, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,2,4), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,4),      0, -1, 0, 10100, 0, 0, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,4), 0.0, -3, 0, 1, -2, 1, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,5,4), 0.0, 99, 0, 1, -3, 0, 0
! END OF EQUATION: -1.2*{TIME}+10100
!采用函数加载
DL,9, ,TEMP, %GW%
DL,3, ,TEMP, %DW%
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,8400
AUTOTS,1
NSUBST,150,300,100,1
KBC,1
RATE,ON    !激活率效应
SOLVE
```

第 12 章　拉伸颈缩有限元分析



12.1　引言

颈缩现象是弹塑性金属试件在单轴拉伸状态下常出现的局部法向明显收缩的力学现象。往往当颈缩现象出现后，试件所需拉力减小，应力-应变曲线相应呈现下降，最终导致试样在颈缩处断裂。

12.2　几何模型

如图 12-1 和图 12-2 分别给出了单轴拉伸的几何模型和刻痕处的放大图，具体几何尺寸为 L_1=0.02m，L_2=0.2m，D_1=0.035m，D_2=0.025m，H=0.001m，D_3=D_2−2H。

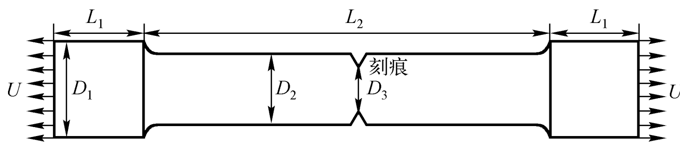


图 12-1　拉伸试件的模型简图

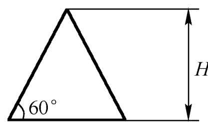


图 12-2　刻痕的放大图

12.3　材料的本构关系

本章实例采用 Inconel718 合金。材料弹性模量 E=105811.5MPa、泊松比 ν=0.3，材料服从非线性等向强化规律。这种材料模型特别适合大变形分析。Voce 强化准则的非线性等向强化行为，由式（12-1）方程给出

$$R=\sigma_0+R_0\hat{\varepsilon}^{pl}+R_\infty(1-\mathrm{e}^{-b\hat{\varepsilon}^{pl}}) \tag{12-1}$$

式中，σ_0 为弹性极限，即屈服应力；R_0, R_∞, b 为与等向强化材料有关的材料参数。

本实例材料模型的各参数取值：σ_0=235MPa，R_0=1120MPa，R_∞=75MPa，b=75。

12.4　单元的选择

本实例选用三维低阶 8 节点 SOLID185 单元模拟拉伸试件。

12.5　边界条件及载荷

约束拉伸试件的两个端面的 y 和 z 方向位移，施加拉伸试件的两个端面的 x 方向位移为

0.2m。

12.6 GUI 操作

12.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 Stretch crunch，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入，L1=0.02、L2=0.2、D1=0.035、D2=0.025、H=0.001、D3=D2-2*H。

3．选择单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 10 node 187 单元，单击“OK”按钮。

4．定义材料模型

GUI：Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 12-3 所示，输入 EX=1.0581E11、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框。继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Nonlinear，弹出非线性各向同性材料模型定义面板，如图 12-4 所示，输入 Sigy0=2.35E8、R0=1.12E9、Rinf=7.5E7、b=75，单击“OK”按钮，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

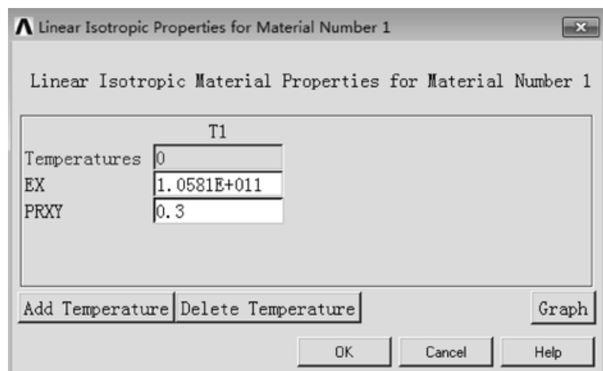


图 12-3　各向同性线弹性材料定义面板

5．建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出在激活坐标系中定义关键点面板，如图 12-5 所示，在面板中关键点号（Keypoint

number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=0，Y=−D1/22，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2，X=L1、Y=−D1/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=L1、Y=−D2/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X= L1+L2/2−H/2、Y= −D2/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X= L1+L2/2、Y= −D3/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6，X= L1+L2/2+H/2、Y= −D2/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7，X= L1+L2、Y= −D2/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 8，X= L1+L2、Y= −D1/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 9，X= L1+L2+L1、Y= −D1/2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 10，X= 0、Y= 0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 11，X= L1+L2+L1、Y= 0、Z=0。

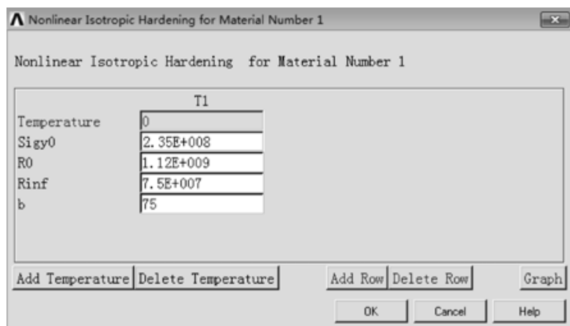


图 12-4 非线性各向同性材料模型定义面板

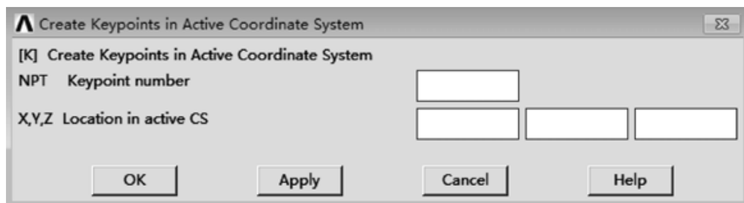


图 12-5 定义关键点面板

（2）定义直线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 1 和 2，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 2 和 3，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 3 和 4，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 4 和 5，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 5 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 6 和 7，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 7 和 8，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 9 和 11，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 11 和 10，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 10 和 1，单击“OK”按钮。

（3）定义直线圆角

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Line Fillet，弹出拾取对话框，拾取线 L2 和 L3，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 12-6 所示，输入圆角半径（Fillet radius）为(D1−D2)/2，单击“Apply”按钮；返回拾取对话框，继续拾取线 L6 和 L7，单击“Apply”按钮；弹出直线圆角设置面板，如图 12-6 所示，输入圆角半

径（Fillet radius）为(D1−D2)/2，单击“OK”按钮。

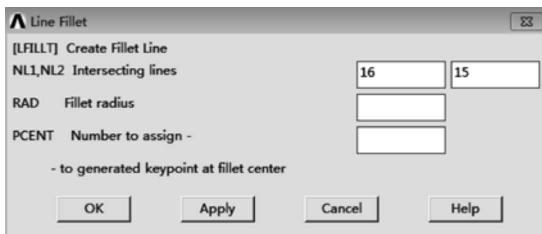


图 12-6　直线圆角设置面板

（4）定义面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1、L12、L3、L4、L5、L6、L2、L8、L9、L10、L11，单击“OK”按钮。

（5）由面旋转成体

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→About Axis，弹出拾取对话框，拾取面 A1，单击“OK”按钮，继续拾取关键点 10 和 11，单击“OK”按钮。

6．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击“设置”（Set）按钮，如图 12-7 所示，弹出如图 12-8 所示的总体网格尺寸设置面板。



图 12-7　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

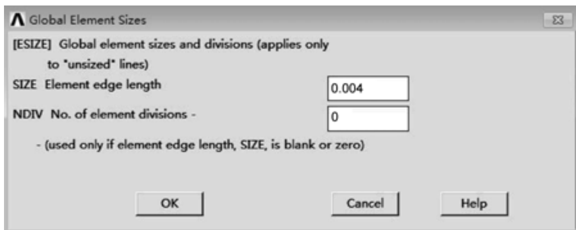


图 12-8　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.004，单击“OK”按钮。

（3）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取拉伸试件，单击“OK”按钮。

12.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 12-9 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

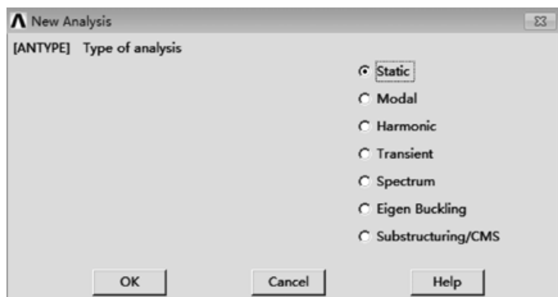


图 12-9　分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 12-10 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

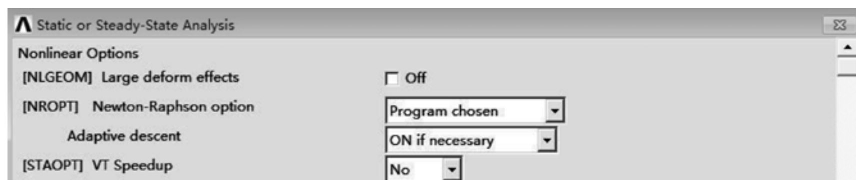


图 12-10　静态分析选项设置面板

2．定义边界条件及载荷

（1）施加左端面的位移约束

1）选择左端面所有的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 12-11 所示，按照图 12-11 进行设置，单击“OK”按钮。

2）约束左端面的 y 和 z 方向位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 12-12 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UY 和 UZ，单击“OK”按钮。

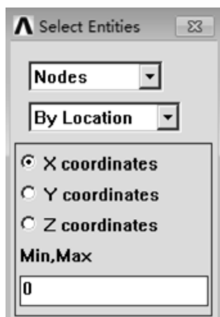


图 12-11　选择实体设置面板

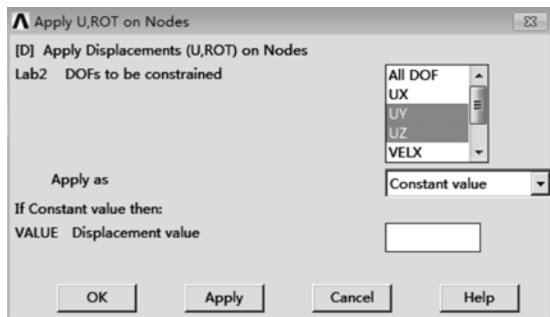


图 12-12　约束节点自由度设置面板

3）施加左端面的 x 方向位移为–0.02

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 12-12 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UX，并在位移值（Displacement）中输入-0.02，单击“OK”按钮。

4）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

（2）施加右端面的位移约束

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 12-13 所示，按照图 12-13 进行设置，单击“OK”按钮。

1）约束左端面的 y 和 z 方向位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 12-12 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UY 和 UZ，单击“OK”按钮。

2）施加左端面的 x 方向位移为 0.02

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出约束节点自由度设置面板，如图 12-12 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 UX，并在位移值（Displacement）中输入 0.02，单击“OK”按钮。

3）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

3．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 12-14 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 100，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），其他保持默认设置，单击“OK”按钮。



图 12-13　选择实体设置面板

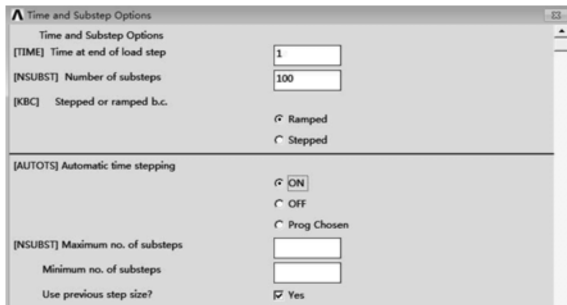


图 12-14　时间和子步选项设置面板

4．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

12.6.3 后处理

图 12-15～图 12-18 分别给出了加载过程中不同求解子步的等效应力云图，由图 12-15～图 12-18 可知随着外载荷的增加，试件刻痕处的截面迅速减小，等效应力逐步增大。

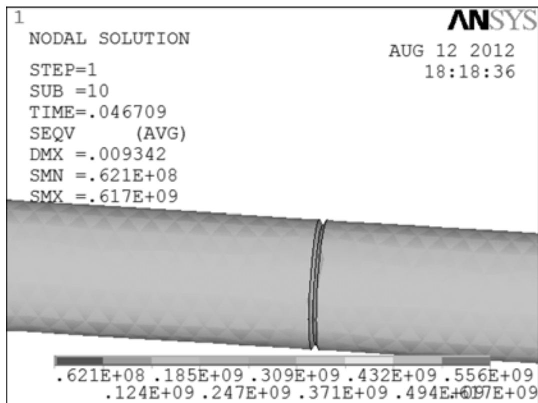


图 12-15 子步为 10 时的等效应力云图

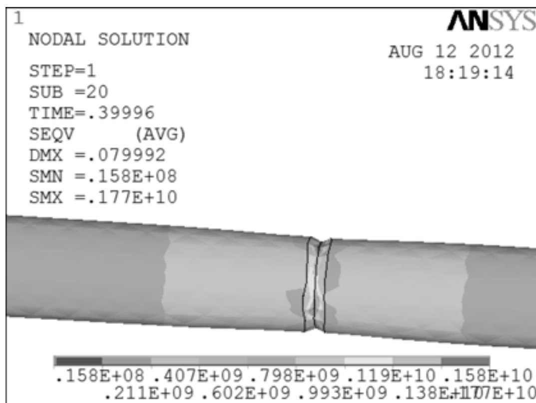


图 12-16 子步为 20 时的等效应力云图

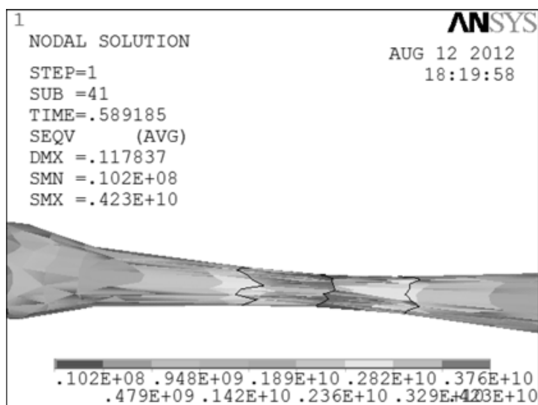


图 12-17 子步为 41 时的等效应力

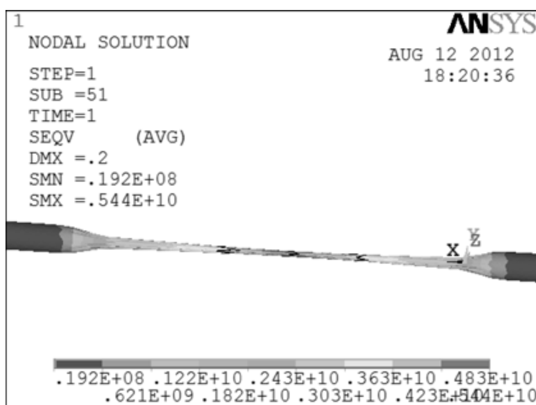


图 12-18 子步为 51 时的等效应力

图 12-19 给出了 7166 节点 y 方向位移与时间的关系，由图 12-19 可知随着拉伸载荷的增大，初期刻痕处截面面积成线性关系减小，但在后期呈现了非线性关系，截面面积的减小速率逐渐减小；图 12-20 给出了 7166 节点等效应力与时间的关系，由图 12-20 可知，等效应力随着外载荷的增加逐渐增加。

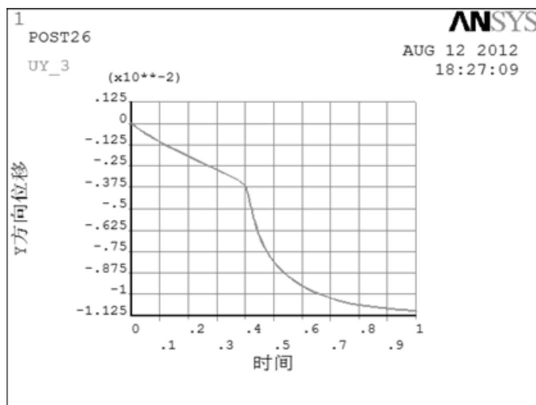


图 12-19　7166 节点 y 方向位移与时间的关系

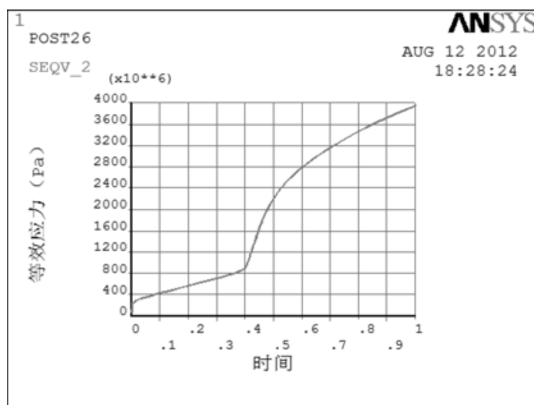


图 12-20　7166 节点等效应力与时间的关系

12.7　命令流

```
/FILNAME,STRETCH CRUNCH,0
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
L1=0.02
L2=0.2
D1=0.035
D2=0.025
H=0.001
D3=D2-2*H
ET,1,SOLID187 !定义单元
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,105811E6   !定义弹性模量
MPDATA,PRXY,1,,0.3      !定义泊松比
TB,NLIS,1,1,4,   ! 定义 Voce 强化准则的非线性等向强化行为
TBTEMP,0
TBDATA,,235E6,1120E6,75E6,75,,
!定义关键点
K,1,0,-D1/2,0
K,2,L1,-D1/2,0
K,3,L1,-D2/2,0
K,4,L1+L2/2-H/2,-D2/2,0
K,5,L1+L2/2,-D3/2,0
K,6,L1+L2/2+H/2,-D2/2,0
K,7,L1+L2,-D2/2,0
K,8,L1+L2,-D1/2,0
```



```
K,9,L1+L2+L1,-D1/2,0
K,10,0,0,0
K,11,L1+L2+L1,0,0
!定义线
L,1,2
L,2,3
L,3,4
L,4,5
L,5,6
L,6,7
L,7,8
L,8,9
L,9,11
L,11,10
L,10,1
!定义线圆角
LFILLT,2,3,(D1-D2)/2, ,
LFILLT,6,7,(D1-D2)/2, ,
!由线定义面
FLST,2,11,4
FITEM,2,11
FITEM,2,1
FITEM,2,12
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,2
FITEM,2,8
FITEM,2,9
FITEM,2,10
AL,P51X
!由面旋转成体
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
FLST,8,2,3
FITEM,8,10
FITEM,8,11
VROTAT,P51X, , , , , ,P51X, ,360,4,
ESIZE,0.004,0, !定义总体网格尺寸
VMESH,ALL !划分所有的体网格
!进入求解器
/SOL
NLGEOM,1 !激活大变形
!定义边界条件
NSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,X,0
NPLOT
D,ALL, , , , , ,UY,UZ, , , ,
D,ALL, ,−0.2, , , ,UX, , , , ,
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
!定义载荷
NSEL,S,LOC,X,L1+L1+L2
NPLOT
D,ALL, , , , , ,UY,UZ, , , ,
D,ALL, ,0.2, , , ,UX, , , , ,
ALLSEL,ALL
!定义载荷步
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,1
AUTOTS,1
NSUBST,100, , ,1
KBC,0
SOLVE
```

第 13 章　三维复合裂纹的有限元分析



13.1　引言

前面介绍了计算二维断裂参数的方法，本章将介绍更加复杂的三维复合裂纹问题。在线弹性断裂力学中，最重要的物理量是应力强度因子，它控制着裂纹尖端附近的应力场与位移场，因此对裂纹尖端应力强度因子研究至关重要。三维断裂问题属于高等断裂力学，很复杂，它们的求解必须使用一些专门的数学工具。有学者认为它们是力学中对应用数学最具有挑战性的领域之一。三维裂纹问题的复杂主要在于两个方面：一是因为场变量数目太大，而且每一个场变量都随着 3 个自变量变化，使得基本方程复杂；二是裂纹边界条件复杂，在数学处理上没有统一的有效方法。但由于实际问题大部分是三维的，所以探讨三维裂纹有很深远的现实意义。

求解应力强度因子 SIFS 主要有以下两种方法。

- 相互作用积分法（Interaction Integral Method）。在分析的求解阶段执行应力强度因子的计算并且在稍后的后处理中存储计算结果。
- 位移外推法。在后处理中执行应力强度因子求解。该方法只能求解具有各向同性的线弹性断裂问题。

相互作用积分法对各种断裂问题具有良好的适应性和计算结果的准确性。本章将使用相互作用积分法计算三维复合裂纹问题。

13.2　几何模型

图 13-1 给出了三维裂纹模型力学简图，图 13-1 中几何尺寸 H=1m，裂纹矩刚性基座距离 H_1=0.45m，L=0.3m，W=0.18m，裂纹长度 a=0.045m。

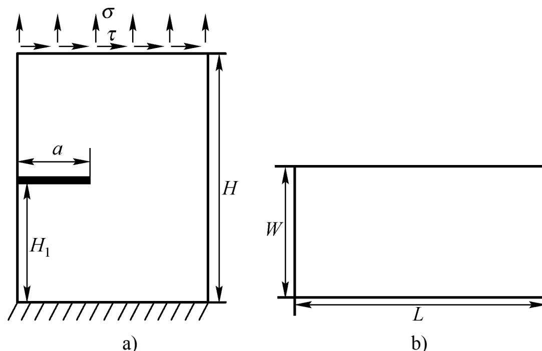


图 13-1　三维裂纹力学模型

a) 三维裂纹模型正视图　b) 三维裂纹模型俯视图

13.3 材料的本构模型

假设该实例模型的应力-应变关系为线弹性，其中弹性模量为 201GPa，泊松比为 0.3。

13.4 单元的选择

本章实例选用 8 节点 PLANE183 单元模拟平面裂纹，选用 20 节点 SOLID186 单元模拟三维裂纹。使用表面效应单元 SURF154 施加模型的表面剪切应力。

13.5 边界条件与载荷

该模型底部为刚性基座约束所有方向位移，顶部承受了拉应力 σ =15MPa，剪切应力 τ =8MPa。

13.6 GUI 操作

13.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入，“Three-dimensional fracture mechanics”，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入：H=1，H1=0.45，L=0.3，W=0.18，A=0.045。

3．选择单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，弹出单元类型设置面板，在左边选择 Solid，然后在右边选择 8 node 183 单元，单击 Apply。继续在左边选择 Solid，然后在右边选择 20 node 186 单元，继续在左边选择 Surface Effect，然后在右边选择 3D structural 154 单元，单击“OK”按钮，返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

4．定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 13-2 所示，输入 EX=2.1E11、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框。

5．建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出在激活坐标系中定义关键点面板，如图 13-3 所示，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=0、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输

入关键点号为 2，X=L、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=L、Y=H1、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X=L、Y=H、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X=0、Y=H、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6，X=0、Y=H1、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7，X=0、Y=H1、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 8，X=A、Y=H1、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 9，X=0、Y=0、Z=W，单击“OK”按钮。



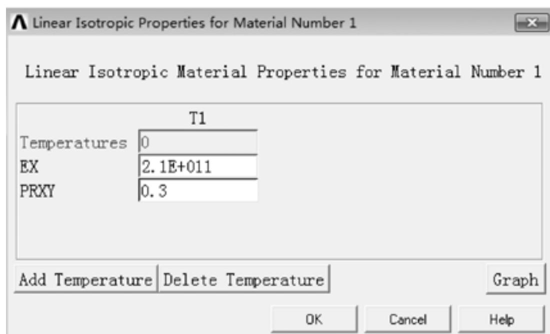


图 13-2 各向同性线弹材料定义面板

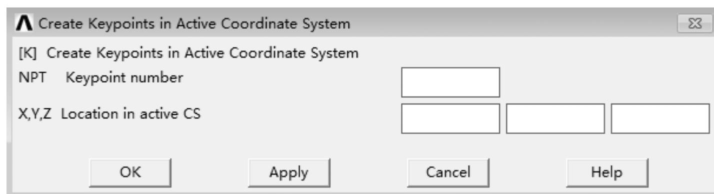


图 13-3 定义关键点面板

（2）定义直线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 1 和 9，单击“OK”按钮。

（3）定义面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，在弹出的拾取对话框中，输入 1，2，3，8，7，单击“Apply”按钮；继续输入 6，8，3，4，5，单击“OK”按钮。

6．网格划分

（1）设置裂纹尖端网格

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Ctrls→Concentrate KPs→Create，弹出拾取对话框拾取裂纹尖端处的关键点 8，单击“OK”按钮，弹出裂纹尖端网格控制面板，如图 13-4 所示，按照图 13-4 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

（2）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（3）设置线网格

单击网格划分工具中尺寸控制区域（Size Controls）中的线（Lines）控制中设置（Set）按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L10，单击“Apply”按钮，弹出线网格设置面板，如图 13-5

所示，按照图 13-5 进行设置，单击“Apply”按钮，弹出拾取对话框，继续拾取线 L6，单击“Apply”按钮，弹出线网格设置面板，如图 13-6 所示，按照图 13-6 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

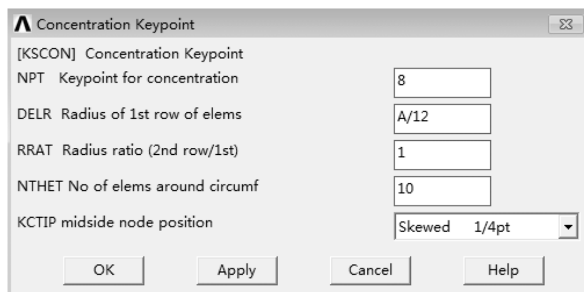


图 13-4 裂纹尖端网格控制面板

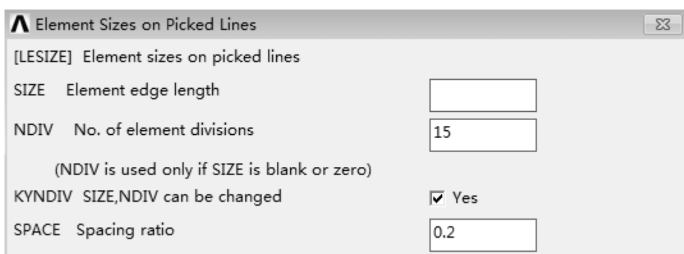


图 13-5 线网格设置面板

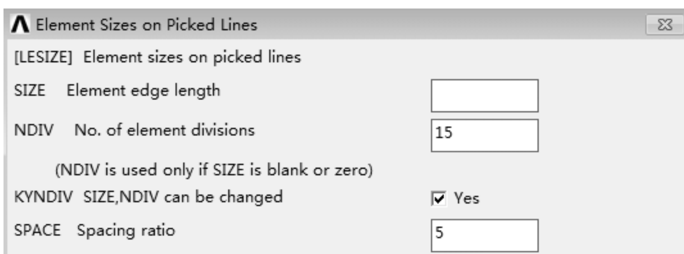


图 13-6 线网格设置面板

（4）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击“设置”（Set）按钮，如图 13-7 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 13-8 所示。

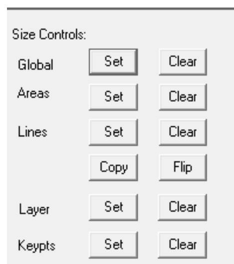


图 13-7 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

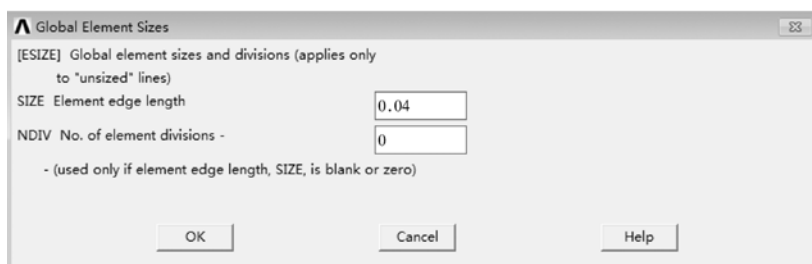


图 13-8 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸控制中输入 0.04，单击“OK”按钮。

（5）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取所有的面，单击“OK”按钮。

7．由面单元转动体单元

（1）定义单元拉伸选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Elem Ext Opts，弹出单元拉伸选项设置面板，如图 13-9 所示，按照图 13-9 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

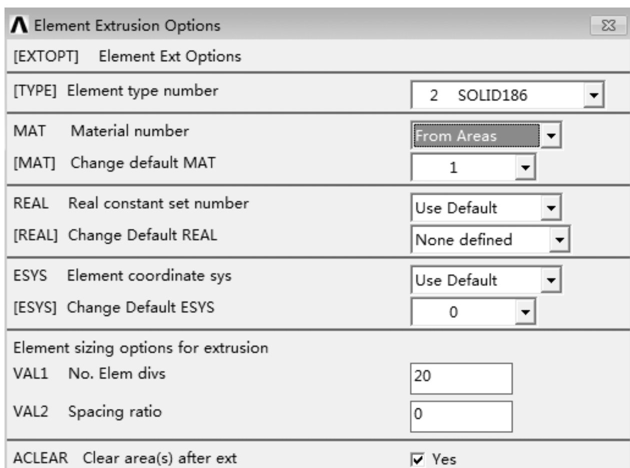


图 13-9 单元拉伸选项设置面板

（2）将平面单元拉伸成体单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Lines，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，继续拾取线 L1，单击“OK”按钮。

（3）删除线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Line and Below，弹出拾取对话框，拾取线 L1，单击“OK”按钮。

8．定义表面效应单元

（1）设置单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 13-10 所示，按照图 13-10 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

（2）选择顶面节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 13-11 所示，按照图 13-11 进行设置，单击“OK”按钮。

（3）定义表面效应单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf/Contact→Surf

Effect→Generl Surface→No extra Node，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

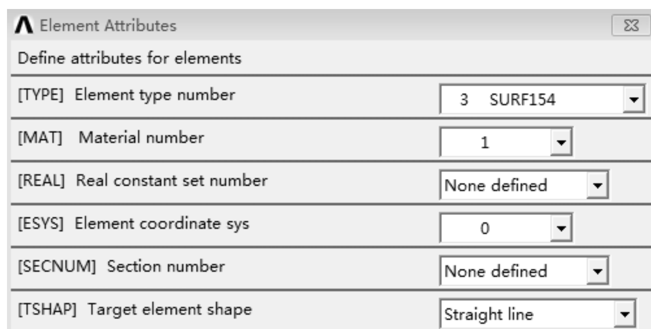


图 13-10 单元属性设置面板

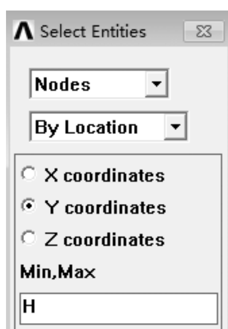


图 13-11 选择实体设置面板

（4）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

13.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 13-12 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

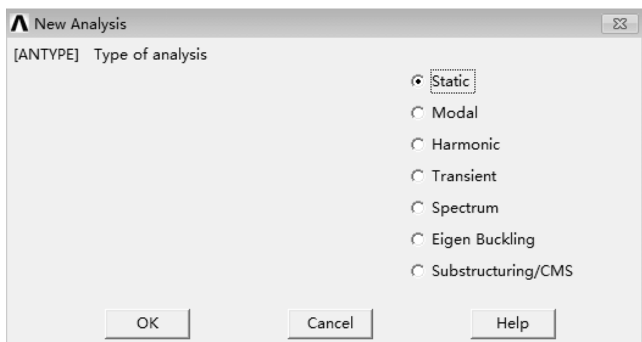


图 13-12 分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 13-13 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

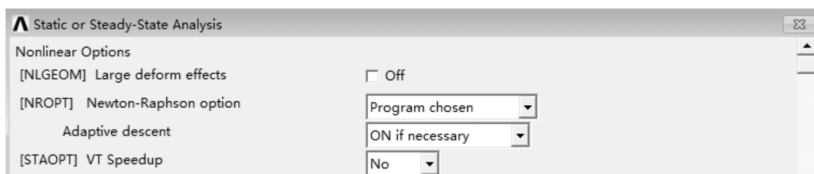


图 13-13 静态分析选项设置面板

2．定义边界条件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出拾取对话框，拾取模型的底面 A3，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中设置约束类型为 All DOF，单击“OK”按钮。

3．定义载荷

（1）定义顶面的拉应力

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Areas，弹出拾取对话框，拾取顶面 A13，单击“OK”按钮，弹出在面上施加压力设置面板，如图 13-14 所示，按照图 13-14 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

（2）定义顶面的剪切应力

1）选择表面效应单元

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 13-15 所示，按照图 13-15 进行设置，单击“OK”按钮。

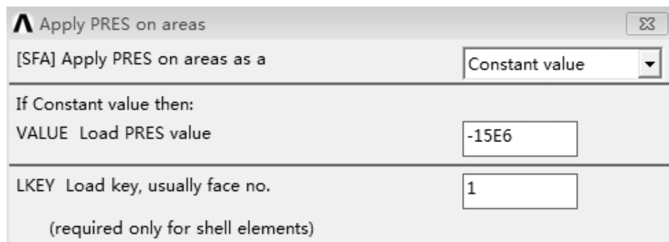


图 13-14　在面上施加压力设置面板

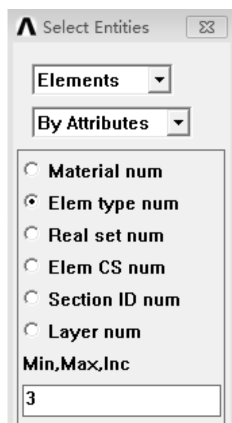


图 13-15　选择实体设置面板

2）施加剪切应力

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Elements，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出在单元上施加压力的设置面板，如图 13-16 所示，按照图 13-16 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

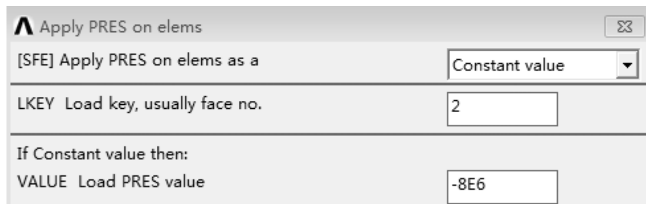


图 13-16　在单元上施加压力的设置面板

3）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

4．设置断裂力学求解

（1）建立局部坐标系

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc，弹出拾取对话框，用鼠标任意拾取一点，单击“OK”按钮，弹出如图 13-17 所示的在指定位置创建局部坐标系设置面板，按照图 13-17 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

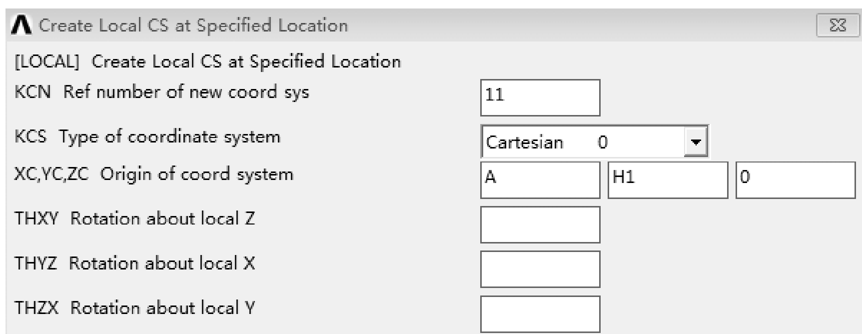


图 13-17 在指定位置创建局部坐标系设置面板

（2）创建裂纹前缘节点组件

1）选择裂纹前缘线

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 13-18 所示，按照图 13-18 进行设置，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，拾取裂纹前缘线 L17，单击“OK”按钮。

2）选择依附于线上的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 13-19 所示，按照图 13-19 进行设置，单击“OK”按钮。

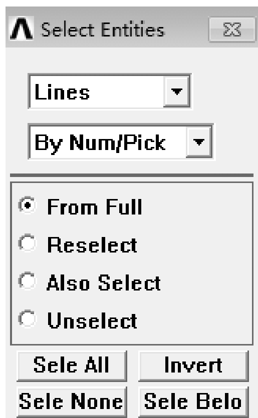


图 13-18 选择实体设置面板

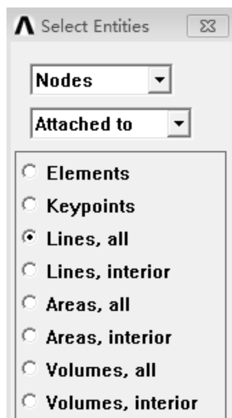


图 13-19 选择实体设置面板

3）创建裂纹前缘节点组件

GUI：单击 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component，弹出创建组件面板，如图 13-20 所示，输入组件名为 CK，单击“OK”按钮。

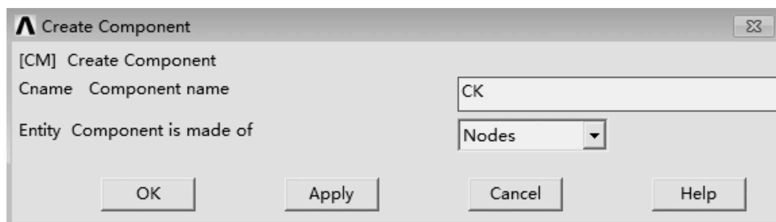


图 13-20 创建组件面板

4）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

（3）使用相互作用积分法计算应力强度因子

ANSYS14 对于相互作用积分法暂不支持 GUI 操作，因此只能使用命令流，其命令流如下：

```
CINT,NEW,1
CINT,TYPE,SIFS
CINT,CTNC,CK,85,0
CINT,NCON,5                !绕线积分条数
CINT,SYMM,OFF              !裂纹不具有对称性
CINT,NORM,11,2             !裂纹面法向
```

5．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出求解提示对话框，单击“OK”按钮。

13.6.3 后处理

图 13-21 所示裂纹尖端区域的位移云图，由图可知裂纹尖端区域位移是连续的没有奇异性；图 13-22 给出了裂纹尖端区域的等效应力云图，由图可知裂纹尖端区域应力具有奇异性。图 13-23～图 13-25 分别给出了裂纹前缘的 I，II 型和 III 型应力强度因子求解结果，由求解结果可知，ANSYS 的相互作用积分法计算裂纹前缘的应力强度因子准确可靠。

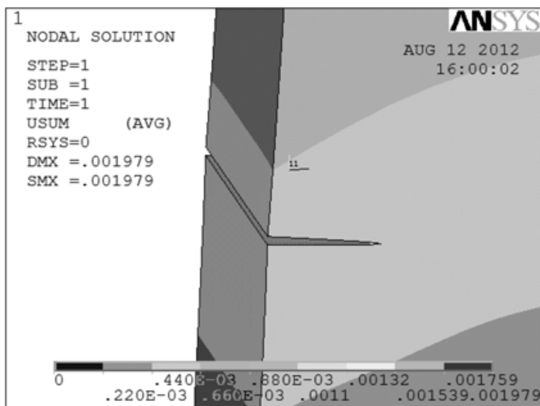


图 13-21 裂纹尖端区域的位移云图

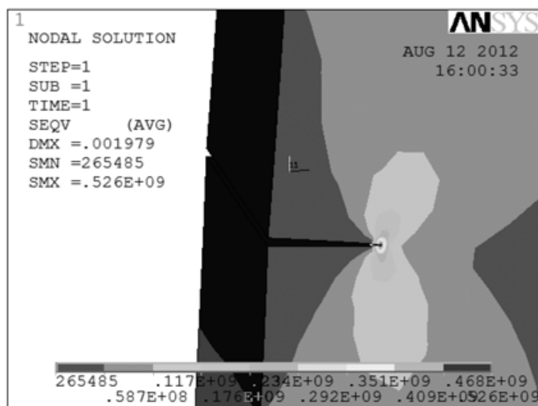


图 13-22 裂纹尖端区域的等效应力云图

```
***** POST1 K1           RESULT LISTING *****

 CrackID =   1
  Crack Front Node =   42
   Contour Values =   0.39406E+08  0.39022E+08  0.39006E+08  0.38946E+08
   Contour Values =   0.38932E+08
  Crack Front Node = 2532
   Contour Values =   0.36668E+08  0.40192E+08  0.40120E+08  0.40057E+08
   Contour Values =   0.40048E+08
  Crack Front Node = 2533
   Contour Values =   0.41680E+08  0.41264E+08  0.41051E+08  0.40915E+08
   Contour Values =   0.40895E+08
  Crack Front Node = 2534
   Contour Values =   0.38285E+08  0.42091E+08  0.41795E+08  0.41568E+08
   Contour Values =   0.41510E+08
```

图 13-23　裂纹前缘 I 型应力强度因子列表

```
***** POST1 K2           RESULT LISTING *****

 CrackID =   1
  Crack Front Node =   42
   Contour Values =   0.18302E+07  0.18518E+07  0.18504E+07  0.18754E+07
   Contour Values =   0.19017E+07
  Crack Front Node = 2532
   Contour Values =   0.15865E+07  0.17851E+07  0.17916E+07  0.18167E+07
   Contour Values =   0.18419E+07
  Crack Front Node = 2533
   Contour Values =   0.17491E+07  0.17668E+07  0.17803E+07  0.18141E+07
   Contour Values =   0.18431E+07
  Crack Front Node = 2534
   Contour Values =   0.15557E+07  0.17481E+07  0.17663E+07  0.18077E+07
   Contour Values =   0.18432E+07
```

图 13-24　裂纹前缘 II 型应力强度因子列表

```
***** POST1 K3           RESULT LISTING *****

 CrackID =   1
  Crack Front Node =   42
   Contour Values =   0.26931E+07  0.14507E+08  0.42587E+08  0.10069E+09
   Contour Values =   0.19302E+09
  Crack Front Node = 2532
   Contour Values =  -0.35168E+06 -0.37319E+06 -0.37385E+06 -0.37459E+06
   Contour Values =  -0.37429E+06
  Crack Front Node = 2533
   Contour Values =  -0.30153E+06 -0.30067E+06 -0.30012E+06 -0.30018E+06
   Contour Values =  -0.30022E+06
  Crack Front Node = 2534
   Contour Values =  -0.20101E+06 -0.22319E+06 -0.22526E+06 -0.22367E+06
   Contour Values =  -0.22421E+06
```

图 13-25　裂纹前缘 III 型应力强度因子列表

13.7 命令流



```
/FILNAME,Three-dimensional fracture mechanics,0
!进入前处理器
/PREP7
!定义载荷
H=1
H1=0.45
L=0.3
W=0.18
A=0.045
ET,1,PLANE183                    !定义实体平面单元
ET,2,SOLID186                    !定义三维实体单元
ET,3,SURF154                     !定义表面效应单元
MP,EX,1,2.1E11                   !定义弹性模量
MP,PRXY,1,0.3                    !定义泊松比
!定义关键点
K,1,0,0,0
K,2,L,0,0
K,3,L,H1,0
K,4,L,H,0
K,5,0,H,0
K,6,0,H1,0
K,7,0,H1,0
K,8,A,H1,0
K,9,0,0,W
!定义线
L,1,9
!定义面
A,1,2,3,8,7
A,6,8,3,4,5
KSCON,8,A/12,1,10,1              !设置裂纹尖端网格尺寸
LESIZE,10, , ,15,0.2, , , ,1     !设置线 L10 的单元数量
LESIZE,6, , ,15,5, , , ,1        !设置线 L6 的单元数量
ESIZE,0.04                       !设置总体网格尺寸
AMESH,ALL                        !划分所有的面
!将面单元拉伸成体单元
TYPE,     2                      !设置单元类型为 2
EXTOPT,ESIZE,20,0,               !设置拉伸的单元数
EXTOPT,ACLEAR,1                  !生成体单元后清除面网格
EXTOPT,ATTR,0,0,0
MAT,1
REAL,_Z4
ESYS,0
!*
```

```
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VDRAG,P51X, , , , , ,            1
!删除线 L1
LDELE,           1, , ,1
!设置单元属性
TYPE,     3
MAT,           1
REAL,
ESYS,           0
SECNUM,
TSHAP,LINE
!生成表面效应单元
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,H
NPLOT
!*
FLST,5,537,1,ORDE,10
FITEM,5,835
FITEM,5,863
FITEM,5,-878
FITEM,5,23510
FITEM,5,23538
FITEM,5,-23553
FITEM,5,24231
FITEM,5,-24308
FITEM,5,25488
FITEM,5,-25912
CM,_Y,node
NSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,node
CMSEL,,_Y
!*
CMSEL,,_Y1
ESURF,0
CMSEL,,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
ALLSEL,ALL
!进入前处理器
/SOL
ANTYPE,0!激活静力学求解
!定义边界条件
DA,3,ALL,
!定义拉应力
```

```
SFA,11,1,PRES,-15E6
SFCUM,PRES,ADD,1,1,
!施加切向应力
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
EPLOT
SFE,ALL,2,PRES, ,-8E6, , ,
ALLSEL,ALL
!定义局部坐标系
LOCAL,11,0,A,H1,0, , , ,1,1,
LSEL,ALL
LSEL,S, , ,17 !选择线 L17
NSEL,ALL    !选择所有的节点
NSLL,S,1     !选择依附于线的节点
CM,CK,NODE !将选择的裂纹前缘的节点定义成组件 CK
ALLSEL,ALL
!设置断裂计算参数
CINT,NEW,1
CINT,TYPE,SIFS
CINT,CTNC,CK,85,0
CINT,NCON,5                        !绕线积分条数
CINT,SYMM,OFF                      !裂纹不具有对称性
CINT,NORM,11,2                     !裂纹面法向
SOLVE
SAVE

/POST1
PRCINT,1,,K1                       !输出 I 型应力强度因子
PRCINT,1,,K2                       !输出 II 型应力强度因子
PRCINT,1,,K3                       !输出 III 型应力强度因子
```



第 14 章　印制电路板装配体的 PSD 分析

14.1　引言

随着电子工业的迅速发展，电子设备应用的范围越来越广，无论是在日常生活中还是在军事领域里，到处都可以看到电子设备的身影。随着电子设备的功能不断增强，电子设备的结构也越来越复杂。系统越复杂，所带来的问题也就越多，其可靠性则越重要。电子设备在运输、贮存和使用过程中不可避免地要受到各种机械力——振动、冲击、离心力及运动产生的摩擦力作用，其中振动与冲击对电子设备的危害最大。

由于很多电子设备结构过于复杂，所包含的元器件过多，因此，要分析电子设备的动态特性，所面临的困难较大。一种比较可行的办法是从印制电路板的动力学分析入手，以减少分析的难度。印制电路板是电子设备的重要部件，小到日常生活中的家用电器、手机，大到车载电子设备、飞机上使用的航空电子产品。

因此，印制电路板对整个电子设备的可靠性至关重要，有必要运用动力学的相关知识和有限元方法对印制电路板进行深入的动力学分析，以便较为细致地了解印制电路板的动态特性，在此基础上进行优化设计，以提高印制电路板的可靠性。本实例使用 ANSYS 的接触分析功能，完成印制电路板中的集成电路封装体与电路板之间的装配关系，并以此为载体详细介绍动力学分析中的模态分析、谐响应分析、谱分析的步骤和常见的疑难问题。

14.2　几何模型

图 14-1 给出了印制电路板（PCB）的平面模型。PCB 主要由电路基板（circuit board）

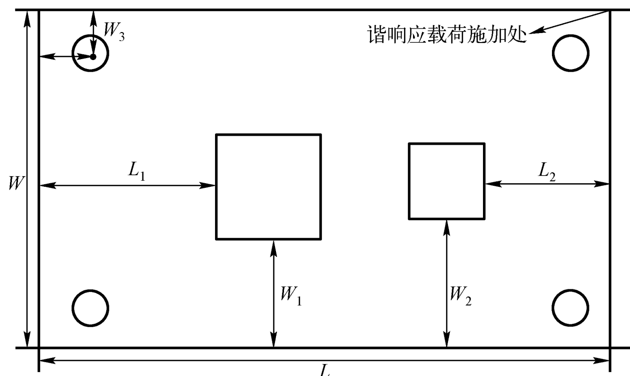


图 14-1　印制电路板的平面模型

和集成电路封装体（IC packages）组成，该模型中由两个集成电路封装体和四个小的电路板固定柱组成，具体几何尺寸：电路板厚度 H_1=1mm，电路板固定柱高度 H_2=12mm，两个集成电路封装体的厚度 H_3=5mm，L=0.28m，W=0.2m，W_1=0.05m，L_1=0.06m，W_2=0.02m，L_2=0.12m，W_3=0.007m，电路板固定柱半径 R_1=0.002m，较大方形集成电路封装体的边长 L_3=0.012m，较小方形集成电路封装体的边长 L_4=0.009m。



14.3 材料的本构模型

假设整个分析过程中，只考虑材料的线弹性。电路板的支撑圆柱体的弹性模量为71GPa、泊松比为 0.33、密度为 2770kg/m^3；电路板和集成电路封装体的弹性模量为1.1GPa、泊松比为 0.42、密度为 950kg/m^3。整个结构的阻尼比为 0.01。

14.4 单元的选择

本实例选用 SHELL181 单元模拟电路板，SOLID185 单元模拟集成电路封装体，BEAM188 模拟电路板的支撑圆柱体。采用接触向导定义电路板与集成电路封装体的装配关系。

14.5 边界条件和载荷

位移边界条件：完全约束电路板的支撑圆柱体的底端。谐响应分析的激励载荷幅值为50N、激励频率范围 0～300Hz、初始相位角为 0°。施加位置如图 14-1 所示。谱分析为基础激励的加速度谱的功率谱密度分析，图 14-2 给出了施加在基础处的加速度谱值。

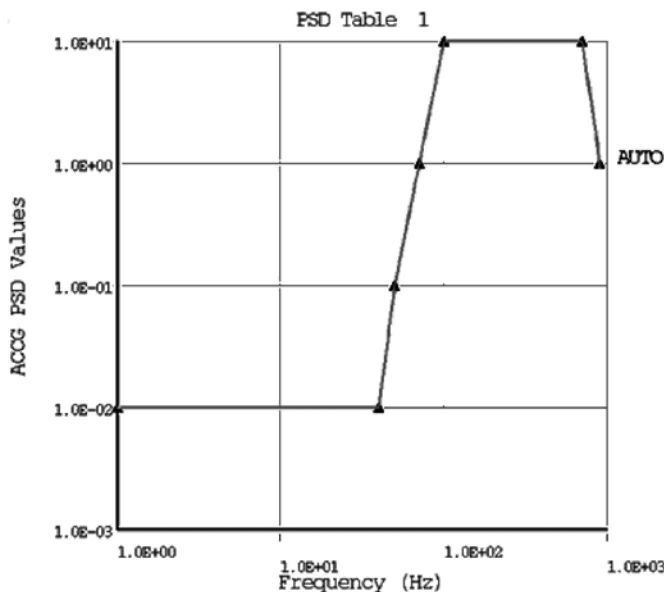


图 14-2 PSD 基础激励值

14.6 GUI 操作

14.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入，“PSD analysis of PCB”，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入 H1=0.0015，H2=0.016，H3=0.006，L=0.28，W=0.20，W1=0.05，L1=0.05，W2=0.07，L2=0.03，W3=0.008，L3=0.08，L4=0.05，R1=0.002。

3．选择单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Shell，然后在右边选择 3D 4 node 181 单元，单击“Apply”按钮；继续在对话框的左边选择 Beam，然后在右边选择 2 node 188，单击“Apply”按钮；继续在对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Brick 8 node 185，单击“OK”按钮。

4．定义材料模型

（1）定义电路板的支撑圆柱体材料参数

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 14-3 所示，输入 EX=7.1E9、PRXY=0.33，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Density，弹出材料密度定义面板，如图 14-4 所示，输入 2770，单击“OK”按钮。

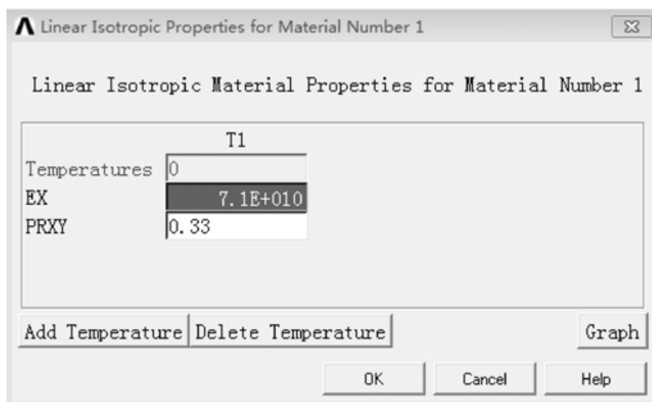


图 14-3　各向同性线弹性材料定义面板

（2）定义电路板和集成电路封装体的材料参数

单击 Material→New Model，在弹出的对话框框中输入 2，单击“OK”按钮。单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出图 14-3 所示各向同性线弹性材料定义面板，输入 EX=1.1E9、PRXY=0.42，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Density，弹出

材料密度定义面板，如图 14-4 所示，输入 950，单击“OK”按钮，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

5．定义截面信息

（1）定义梁截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Beam→Common Sections，弹出梁截面设置面板，如图 14-5 所示，按照图 14-5 进行设置，设置完毕后，单击“OK”按钮。

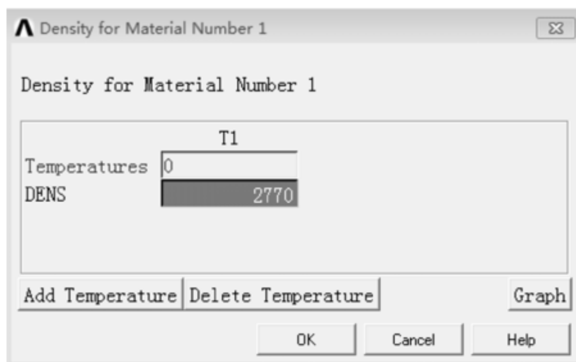


图 14-4　材料密度定义面板

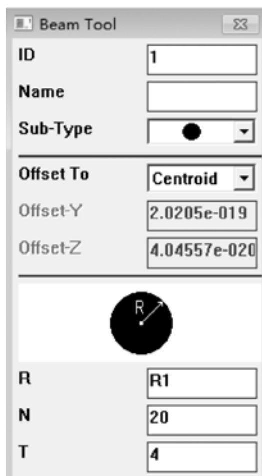


图 14-5　梁截面设置面板

（2）定义壳体截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add/Edit，弹出壳体截面设置面板，如图 14-6 所示，按照图 14-6 进行设置，设置完毕后，单击“OK”按钮。

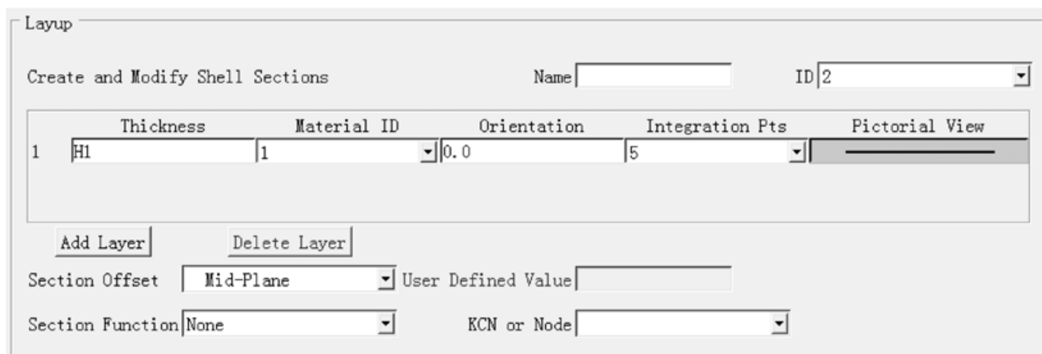


图 14-6　壳体截面设置面板

6．建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出的在激活坐标系中定义关键点面板，如图 14-7 所示，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=W3、Y=0、Z=W3，单击“Apply”按钮；继

续输入关键点号为 2，X=L−W3、Y=0、Z=W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=L−W3、Y=0、Z=W−W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X=W3、Y=0、Z=W−W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X=0、Y=H2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6，X=W3、Y=H2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7，X=L−W3、Y=H2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 8，X=L、Y=H2、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 9，X=L、Y=H2、Z=W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 10，X=L、Y=H2、Z=W−W3，单击“Apply”按钮；续输入关键点号为 11，X=L、Y=H2、Z=W，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 12，X=L−W3、Y=H2、Z=W，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 14，X=0、Y=H2、Z=W，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 15，X=0、Y=H2、Z=W−W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 16，X=0、Y=H2、Z=W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 17，X=W3、Y=H2、Z=W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 18，X=L−W3、Y=H2、Z=W，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 19，X=L−W3、Y=H2、Z=W−W3，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 20，X=W3、Y=H2、Z=W−W3，单击“OK”按钮。

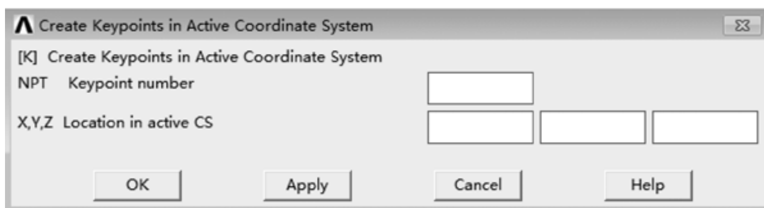


图 14-7 定义关键点面板

（2）定义直线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 1 和 17，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 2 和 18，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 3 和 19，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 4 和 20，单击“OK”按钮。

（3）定义面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，弹出如图 14-8 所示的拾取对话框，输入 5，6，17，16，单击“Apply”按钮；继续输入 7，8，9，18，单击“Apply”按钮；继续输入 19，10，11，12，单击“Apply”按钮；继续输入 15，20，13，14，单击“Apply”按钮；继续输入 16，17，6，7，18，9，10，19，12，13，20，15，单击“OK”按钮。

（4）定义长方体

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions，弹出如图 14-9 所示的通过尺寸创建长方体的设置面板，在面板中输入 X1=L1、X2=L1+L3、Y1=H2、Y2=H2+H3、Z1=W−L3−W1、Z2=W−W1，单击“Apply”按钮；继续输入 X1=L−L2−L4、X2=L−L2、Y1=H2、Y2=H2+H3、Z1=W−L4−W2、Z2=W−W2，单击“OK”按钮。

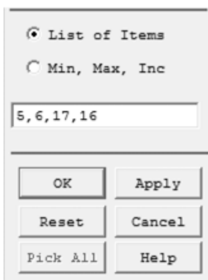


图 14-8 拾取对话框

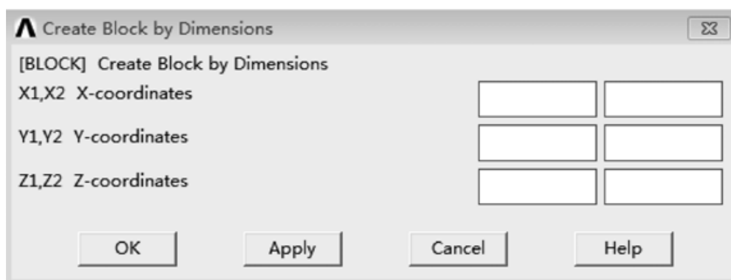


图 14-9 通过尺寸创建长方体的设置面板

7. 网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool。

（2）划分电路基板网格

1）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的“设置”（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 14-10 所示，按照图 14-10 进行设置，单击“OK”按钮。

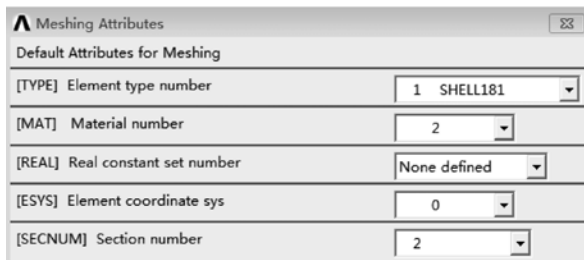


图 14-10 网格属性设置面板

2）设置网格总体尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击“设置”（Set）按钮，如图 14-11 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 14-12 所示。



图 14-11 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

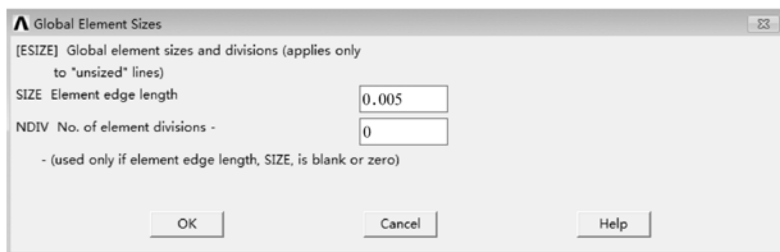


图 14-12 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中存在两个控制选项，单元尺寸控制（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.005，单击“OK”按钮。

3）划分电路基板

单击网格划分工具面板上的“网格划分”（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取电路基板的面 A1，A2，A3，A4 和 A5，单击“OK”按钮。

（3）划分集成电路封装体

1）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的“设置”（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 14-10 所示，设置单元类型为 SOLD185，其他保持默认值，单击“OK”按钮。

2）划分集成电路封装体

单击网格划分工具面板上的“网格划分”（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取集成电路封装体，单击“OK”按钮。

（4）划分电路板的支撑圆柱体

1）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的“设置”（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 14-10 所示，设置单元类型为 BEAM188，材料号为 2，其他保持默认值，单击“OK”按钮。

2）划分电路板的支撑圆柱体

单击网格划分工具面板上的“网格划分”（Mesh）按钮，弹出拾取对话框，拾取四个电路板的支撑圆柱体，单击“OK”按钮。

8．定义装配关系

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出如图 14-13 所示的接触管理器面板。

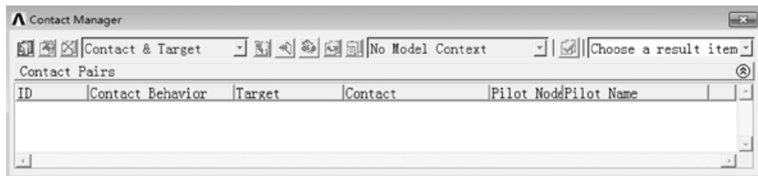


图 14-13　接触管理器面板

（2）创建集成电路封装体与电路基板的装配关系

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 14-14 所示，在该面板中设置目标面类型为面（Areas），设置目标单元类型为柔性体（Flexible），单击“拾取目标面”（Pick Target）按钮，弹出拾取对话框，拾取两个集成电路封装体的底面 A8 和 A14，单击“OK”按钮，返回目标面及目标单元类型设置面板，如图 14-14 所示。

单击“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 14-15 所示，选择接触面类型为面（Areas），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击“Pick Contact”按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A5，单击“OK”按钮，返回图 14-15，单击“Next”按钮，弹出创建接触对面板，如图 14-16 所示单击“选项设置”（Optional settings）按钮，弹出接触对属性设置面板，如图 14-17 所示，设置接触算法为 MPC，单击“OK”按

钮，返回图 14-16，单击“Create”按钮。



图 14-14　目标面及目标单元类型设置面板

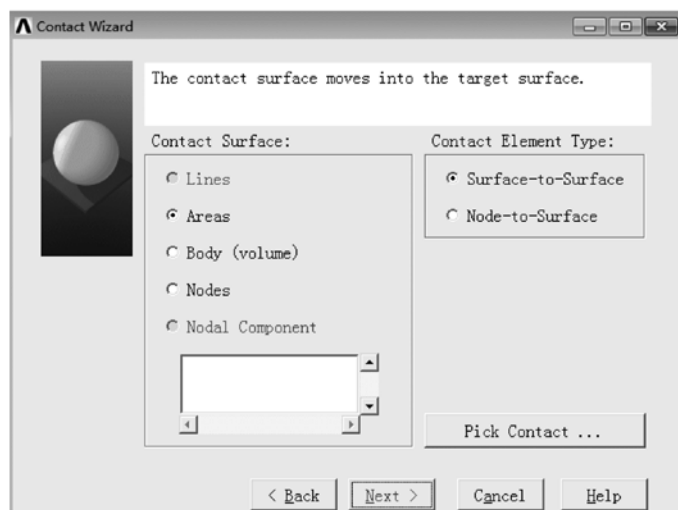


图 14-15　接触面及接触单元类型设置面板

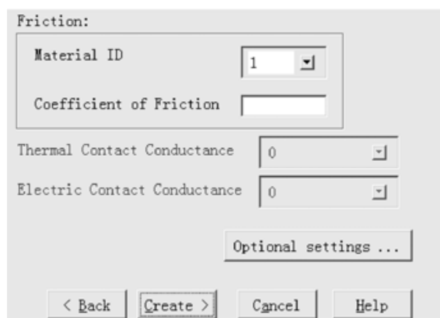


图 14-16　创建接触对面板

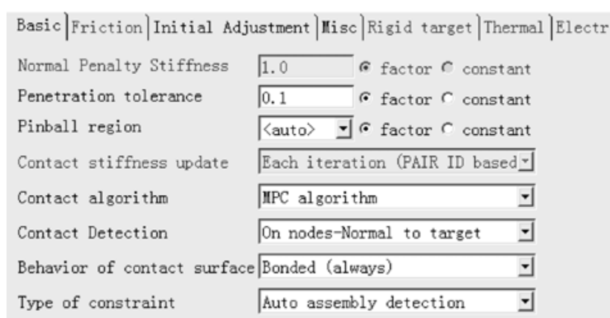


图 14-17　接触对属性设置面板

14.6.2 模态分析

1．设置分析类型

（1）激活模态分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 14-18 所示，选择模态分析（Modal），单击“OK”按钮。

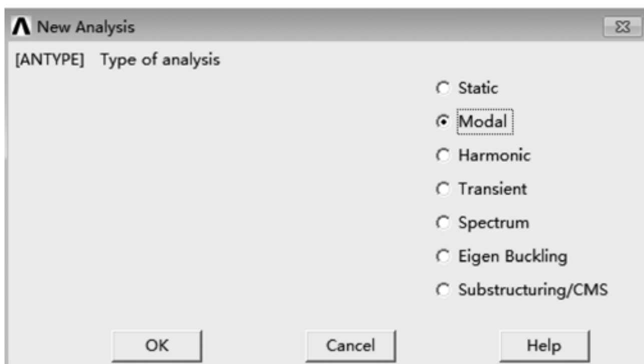


图 14-18　分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出模态分析设置面板，如图 14-19 所示，选择模态计算方法为 Block Lanczos，模态提取阶数（No. of mode）为 100，模态扩展阶数为 100，单击“OK”按钮，弹出 Block Lanczos 方法设置面板，如图 14-20 所示，保持默认设置，单击“OK”按钮。

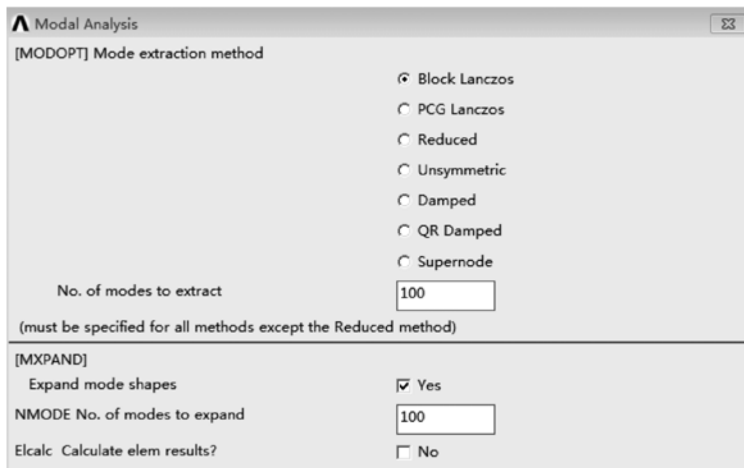


图 14-19　模态分析设置面板

2．定义位移约束

（1）选择电路板的支撑圆柱体底端节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 14-21 所

示，按照图 14-21 所示进行设置，单击“OK”按钮。

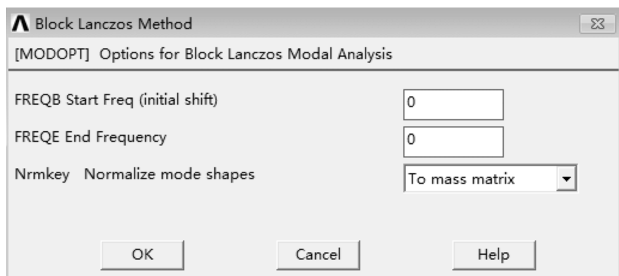


图 14-20 Block Lanczos 方法设置面板



图 14-21 选择实体设置面板

（2）完全约束所选节点

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，在弹出的对话框中选择约束类型为 All DOF，单击“OK”按钮。

（3）创建基础节点组件

GUI：单击 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component，弹出创建组件面板，如图 14-22 所示，输入节点组件名字为 BASE_EXCIT，单击“OK”按钮。

（4）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything。

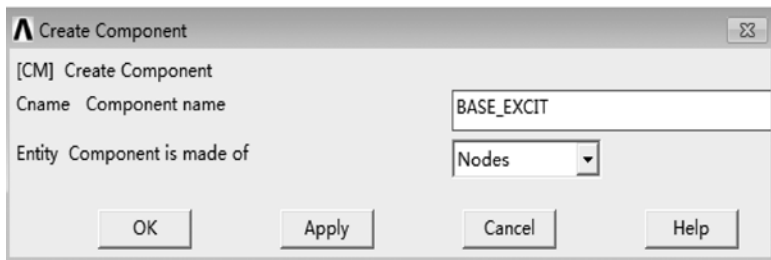


图 14-22 创建组件面板

3. 求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

4. 完成求解

GUI：单击 Main Menu→Finish。

14.6.3 谐响应分析

1. 设置分析类型

（1）激活模态分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 14-23 所示，选择谐响应分析（Harmonic），单击“OK”按钮。



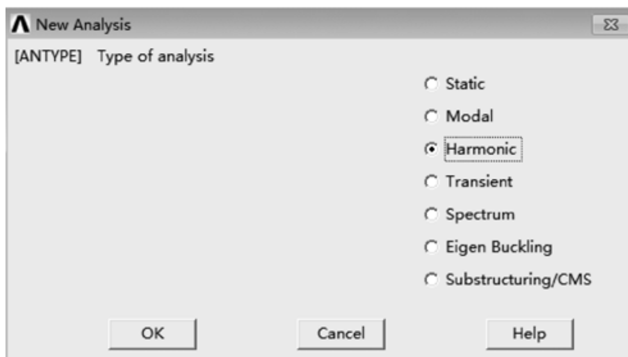


图 14-23　分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出谐响应分析设置面板，如图 14-24 所示，选择谐响应计算方法为模态叠加法（振型叠加法，Mode Superpos'n），其他保持默认设置，单击“OK”按钮，弹出模态叠加法谐响应分析设置面板，如图 14-25 所示，输入最大模态号为 100，最小模态号为 1，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

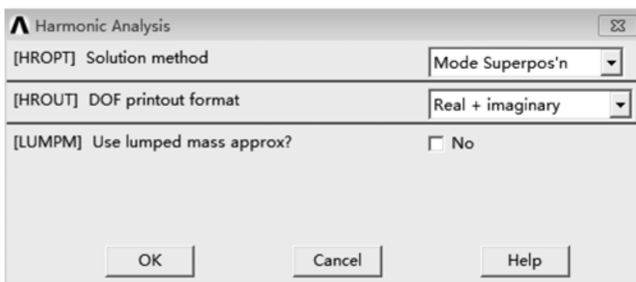


图 14-24　谐响应分析设置面板

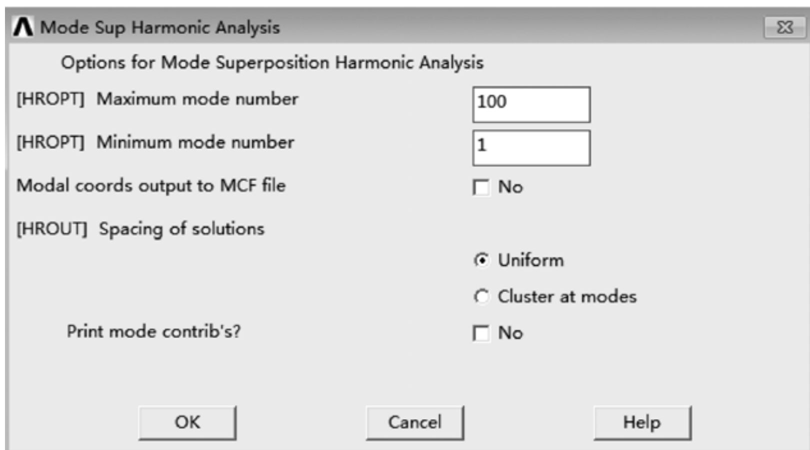


图 14-25　模态叠加法谐响应分析设置面板

2．定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Node，弹出拾取对话框，拾取角节点 11，单击“OK”按钮，弹出如图 14-26 所示在节点上施加力/力矩设置面板，按照图 14-26 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

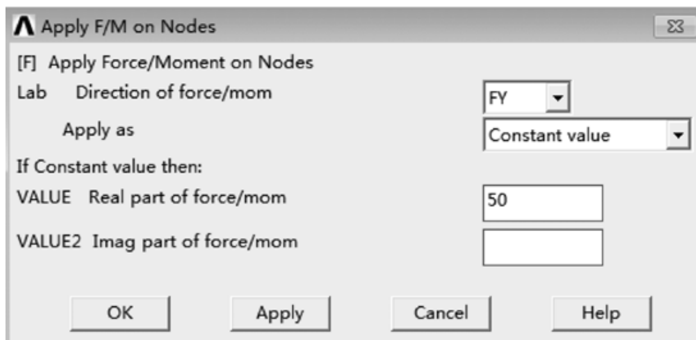


图 14-26 在节点上施加力/力矩设置面板

3．定义载荷步

（1）定义激励频率

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Freq and Substeps，弹出谐响应激励频率和子步设置面板，如图 14-27 所示，按照图 14-27 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

（2）定义阻尼

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Damping，弹出阻尼设置面板，如图 14-28 所示，按照图 14-28 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

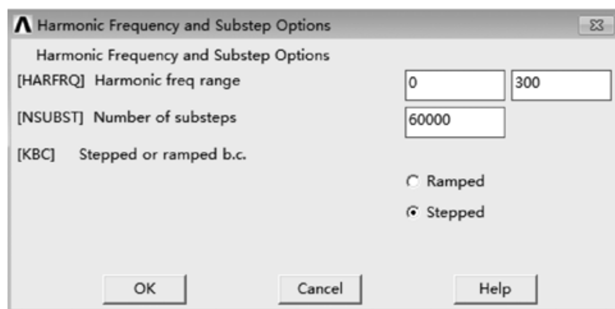


图 14-27 谐响应激励频率和子步设置面板

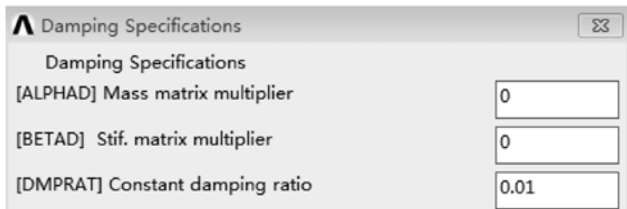


图 14-28 阻尼设置面板

4．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

14.6.4 谱分析

1．设置分析类型

（1）激活模态分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 14-29 所示，选择谱分析（Spectrum），单击“OK”按钮。

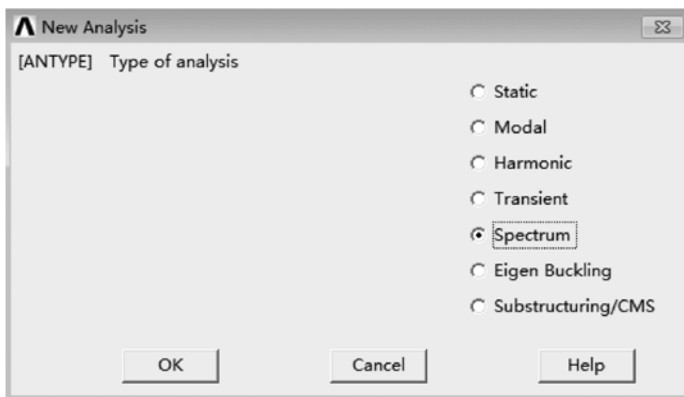


图 14-29 分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出谱分析设置面板，如图 14-30 所示，设置谱分析类型为功率谱密度分析（PSD，也称为随机振动分析），为求解准备 100 阶模态，设置完毕后，单击“OK”按钮。

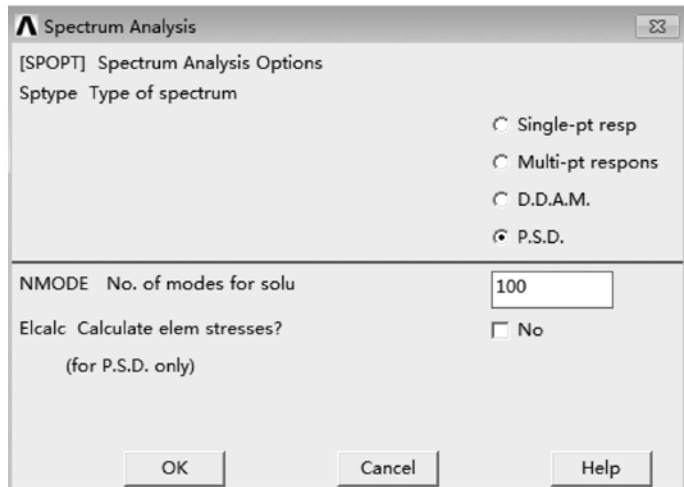


图 14-30 谱分析设置面板

2．定义载荷步

（1）定义阻尼

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Damping，弹出阻尼设置面板，如图 14-28 所示，按照图 14-28 进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。

（2）设置谱分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Settings，弹出 PSD 设置面板，如图 14-31 所示，设置响应谱类型（Type of response spect）为重力加速度，对应的表格号为 1，重力加速度值为 9.81，基础激励方向矢量为 0、1、0，即 *y* 方向，基础激励节点组件名为 BASE_EXCIT，单击“OK”按钮。

Settings for PSD Analysis

Settings for PSD Analysis

[PSDUNIT] Type of response spct　Accel (g**2/Hz)

Table number　1

GVALUE　9.81

- valid only for Accel (g**2/Hz)

[SED] Excitation direction in global Cartesian

SEDX, SEDY, SEDZ　0　1　0

Component name of excited nodes　BASE_EXCIT

OK　Cancel　Help

图 14-31　PSD 设置面板

（3）定义 PSD 值与对应的频率表

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→PSD vs Freq，弹出定义 PSD 与频率的表格号设置对话框，保持默认设置，单击“OK”按钮，弹出 PSD 与频率表，如图 14-32 所示，按照表进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

PSD vs Frequency Table

[PSDVAL] [PSDFRQ] PSD vs Frequency Table No. 1

Enter up to 50 values of	Frequency	PSD Value
FREQ1, PSD1	1	0.01
FREQ2, PSD2	40	0.01
FREQ3, PSD3	50	0.1
FREQ4, PSD4	70	1
FREQ5, PSD5	100	10
FREQ6, PSD6	700	10
FREQ7, PSD7	900	1
FREQ8, PSD8	1000	1

图 14-32　PSD 与频率表

（4）计算参与系数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Calculate PF，弹出计算参与系数设置面板，如图 14-33 所示，按照图 14-33 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

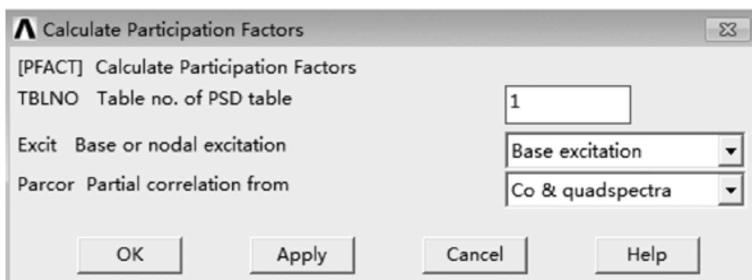


图 14-33　计算参与系数设置面板

（5）设置 PSD 计算控制

GUI：Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Calc Controls，弹出图 14-34 所示 PSD 计算控制面板。该面板有三个选项：位移解（Displacement solution），该选项输出位移、应力、应变和力，并且可以设置这些结果相对于基础的值（Relative to base）、绝对值（Absolute）和不计算任何值（Do not calculate）；速度解（Velocity solution），该选项输出速度、应力速度和力速度，并且可以设置这些结果相对于基础的值（Relative to base）、绝对值（Absolute）和不计算任何值（Do not calculate）；加速度解（Acceleration solution）该选项输出速度、应力加速度和力加速度，并且可以设置这些结果相对于基础的值（Relative to base）、绝对值（Absolute）和不计算任何值（Do not calculate）。按照图 14-34 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

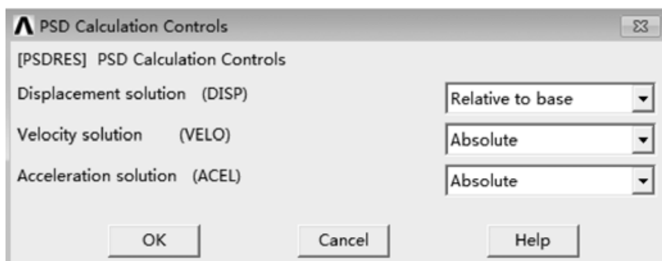


图 14-34　PSD 计算控制面板

（6）合并模态

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Mode Combine，弹出 PSD 模态合并方法设置面板，如图 14-35 所示，按照图 14-35 设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

3．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

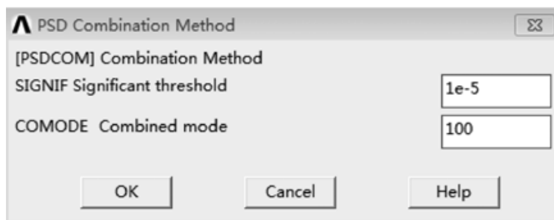


图 14-35　PSD 模态合并方法设置面板

14.6.5 后处理

1．模态求解后处理

图 14-36～图 14-39 分别给出了前四阶固有频率及其对应的振型云图，由图 14-36～图 14-39 可知一阶振型为中间完全振动模态，二阶振型为两侧振动模态，三阶振型为前后振动模态，四阶振型为四边振动模态。

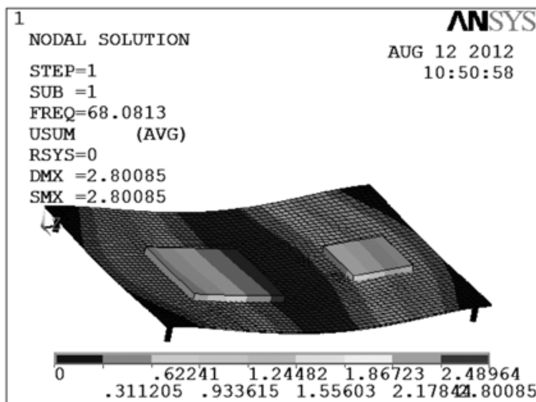


图 14-36　一阶固有频率对应的振型

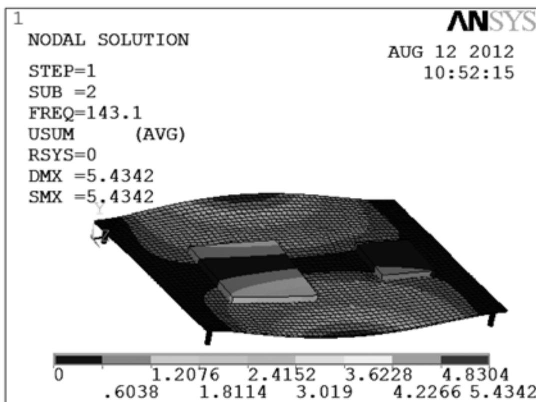


图 14-37　二阶固有频率对应的振型

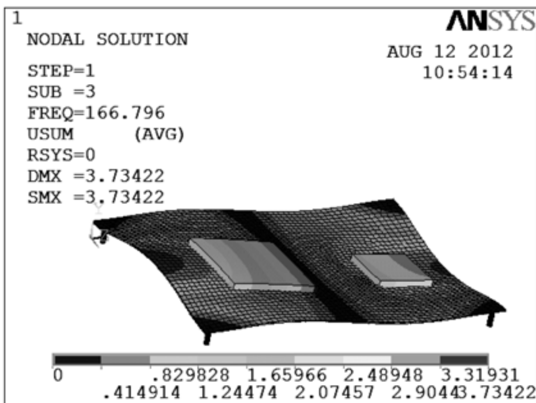


图 14-38　三阶固有频率对应的振型

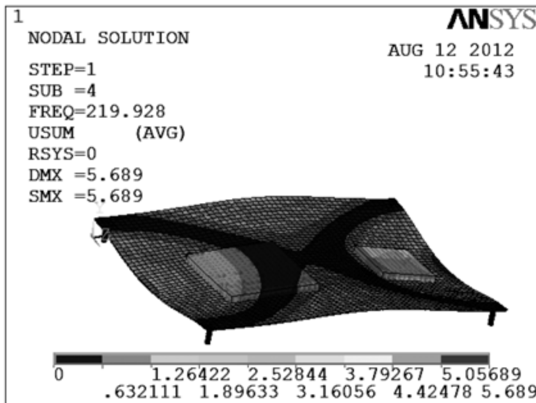


图 14-39　四阶固有频率对应的振型

2．谐响应求解后处理

图 14-40 给出了加载点 *y* 方向位移与激励频率的关系，由图 14-40 可知在固有频率附近存在振动位移峰值，在 0～300Hz 内共有四个峰值。图 14-41 给出了加载点的相位角度与激

励频率的关系，由图 14-41 可知只有在共振频率处相位角会发生突变。图 14-42 和图 14-43 分别给出了一阶和二阶共振频率列表，由图 14-42 和图 14-43 可知一阶共振频率为 67.935Hz，二阶共振频率为 142.51Hz，这与前面模态分析的固有频率存在差别，原因主要是结构存在阻尼，导致共振频率点发生偏移。

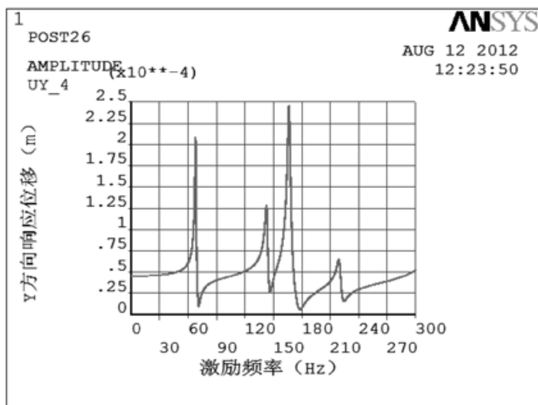


图 14-40　加载点 *Y* 方向位移与激励频率的关系

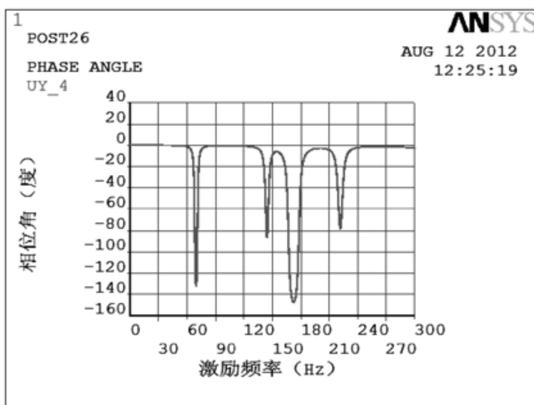


图 14-41　加载点的相位角与激励频率的关系

67.930	0.208047E-03	-65.7217
67.935	0.208047E-03	-66.1054
67.940	0.208038E-03	-66.4903
67.945	0.208018E-03	-66.8763
67.950	0.207988E-03	-67.2634
67.955	0.207947E-03	-67.6515
67.960	0.207895E-03	-68.0405
67.965	0.207833E-03	-68.4306

图 14-42　一阶共振频率列表

142.50	0.128257E-03	-44.9638
142.51	0.128258E-03	-45.1023
142.51	0.128257E-03	-45.2413
142.52	0.128255E-03	-45.3805
142.52	0.128251E-03	-45.5201
142.53	0.128247E-03	-45.6599
142.53	0.128242E-03	-45.8002
142.54	0.128235E-03	-45.9407
142.54	0.128227E-03	-46.0816

图 14-43　二阶共振频率列表

3．PSD 求解后处理

图 14-44 和图 14-45 分别给出了加载点 *y* 方向和 *x* 方向位移的 PSD 值与频率的关系，由图 14-44 和图 14-45 可知，在结构的共振点附近存在峰值。

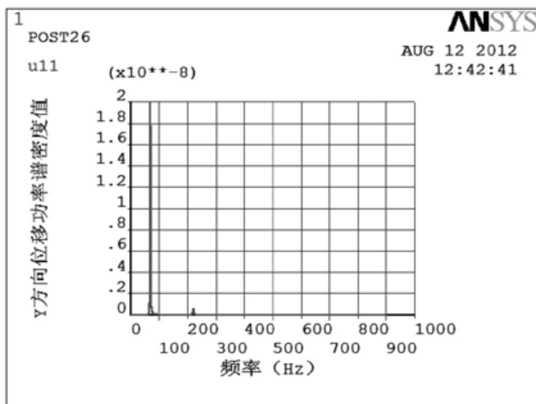


图 14-44　加载点 *Y* 方向位移 PSD 值与频率关系

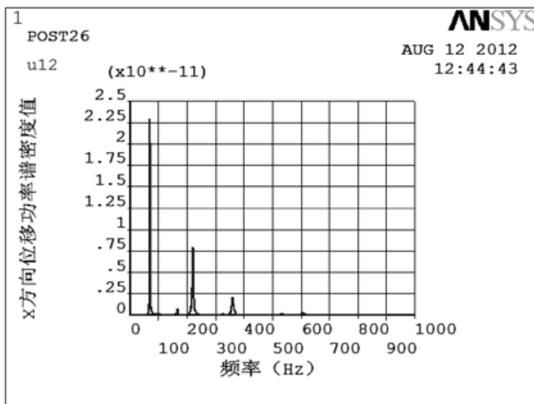


图 14-45　加载点 *X* 方向位移 PSD 值与频率关系

14.7 命令流



```
/FILNAME,PSD analysis of PCB,0
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
H1=0.0015
H2=0.016
H3=0.006
L=0.28
W=0.20
W1=0.05
L1=0.05
W2=0.07
L2=0.03
W3=0.008
L3=0.08
L4=0.05
R1=0.002
!定义单元类型
ET,1,SHELL181
ET,2,SOLID185
ET,3,BEAM188
!定义 1 号材料参数
MP,EX,1,71e9
MP,PRXY,1,0.33
MP,DENS,1,2770
!定义 2 号材料参数
MP,EX,2,1.1e9
MP,PRXY,2,0.42
MP,DENS,2,950
!设置梁截面
SECTYPE,    1, BEAM, CSOLID, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,R1,20,4,0,0,0,0,0,0,0,0,0
!定义壳体截面
sect,2,shell,,
secdata, H1,1,0.0,3
secoffset,MID
seccontrol,,,, , , ,
!定义关键点
K,1,W3,0,W3
K,2,L-W3,0,W3
K,3,L-W3,0,W-W3
K,4,W3,0,W-W3
```

```
K,5,0,H2,0
K,6,W3,H2,0
K,7,L-W3,H2,0
K,8,L,H2,0
K,9,L,H2,W3
K,10,L,H2,W-W3
K,11,L,H2,W
K,12,L-W3,H2,W
K,13,W3,H2,W
K,14,0,H2,W
K,15,0,H2,W-W3
K,16,0,H2,W3
K,17,W3,H2,W3
K,18,L-W3,H2,W3
K,19,L-W3,H2,W-W3
K,20,W3,H2,W-W3
!定义线
L,1,17
L,2,18
L,3,19
L,4,20
!定义面
A,5,6,17,16
A,7,8,9,18
A,19,10,11,12
A,15,20,13,14
A,16,17,6,7,18,9,10,19,12,13,20,15
!定义长方体
BLOCK,L1,L1+L3,H2,H2+H3,W-L3-W1,W-W1,
BLOCK,L-L2-L4,L-L2,H2,H2+H3,W-L4-W2,W-W2,
!开始划分网格
TYPE,    1
MAT,      2
SECNUM, 2
ESIZE,0.005
AMESH,1
AMESH,2
AMESH,3
AMESH,4
AMESH,5

TYPE,    2
MAT,      2
VMESH,ALL

TYPE,    3
```



```
MAT,      1
SECNUM, 1
LMESH,1
LMESH,2
LMESH,3
LMESH,4
!使用接触向导定义基板与集成电路封装体的装配接触关系
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,4,170
ET,5,174
R,3,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
RMORE,10.0
!设置接触单元的关键字
KEYOPT,5,4,2
KEYOPT,5,5,0
KEYOPT,5,7,0
KEYOPT,5,8,0
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
KEYOPT,5,11,0
KEYOPT,5,12,5
KEYOPT,5,2,2
KEYOPT,4,5,0
!生成目标表面
ASEL,S,,,8
ASEL,A,,,14
CM,_TARGET,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
```

```
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
!生成接触表面
ASEL,S,,,5
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!进入求解器
/SOLU
ANTYPE,2                !激活分析类型为模态分析
MODOPT,LANB,100          !设置提取前 100 阶模态
MXPAND,100, , ,0         !扩展 100 阶模态
```



```
MODOPT,LANB,100,0,0, ,OFF
!定义边界条件
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
NPLOT
d,all,all
CM,BASE_EXCIT,NODE
ALLSEL,ALL
solve
finish
!重新进入求解器
/SOLU
ANTYPE,3 !激活分析类型为谐响应分析
HROPT,MSUP, , ,0 !设置谐响应分析的计算方法为模态叠加法
HROUT,ON
LUMPM,0
HROPT,MSUP,0, ,0
HROUT,ON,OFF,0
F,11,FY,50,                         !定义谐响应载荷
HARFRQ,0,300                        !设置谐响应分析激励频率范围 0～300Hz
NSUBST,60000,
KBC,1
!定义阻尼
ALPHAD,0,
BETAD,0,
DMPRAT,0.01,
MDAMP,1, , , , , , ,
SOLVE
/SOLU
antype,spectr                       !激活谱分析
spopt,psd                           !激活谱分析类型为功率谱密度分析
dmprat,0.01                         !设置阻尼比为 0.02
PSDUNIT,1,ACCG,9.81,
SED,0,1,0,BASE_EXCIT                !设置谱分析激励方向为 y 方向
psdfrq,1,,1,40,50,70,100,700,900,1e3
psdval,1,.01,.01,0.1,1,10,10,1,1
pfact,1,base                        !计算参与系数
psdres,disp,rel
psdres,velo,abs
psdres,acel,abs
PSDCOM,1e-5,100,                    !合并模态
solve
finish
```

第 15 章　加强筋板的屈曲和后屈曲分析

15.1　引言

本章工程实例将详细介绍如何使用非线性稳定技术进行结构的非线性屈曲分析和后屈曲分析。本章工程实例为一个加强筋板的顶部受到均匀压力情况下，找出对应的非线性屈曲载荷，达到后屈曲分析阶段的收敛，并对计算结果的检查。屈曲分析对于结构设计和模拟计算成功与否的影响非常重要，特别当结构中包括如壳体和梁结构时，这种影响更加明显。

线性屈曲分析比较直观，但仅仅用于评估，不能作为工程结构屈曲分析的标准计算方法，也不能进行后屈曲分析。非线性屈曲分析没有这个限制，因此在工程设计中得到了广泛的应用。

工程中常用以下计算方法分析结构的失稳或屈曲问题。

非线性稳定技术（Nonlinear stabilization）。该计算方法可以处理结构的局部和整体失稳屈曲，并且也可以和其他非线性性求解方法一起使用，但不能和弧长法同时使用。

弧长法（Arc-length method）。该方法仅能处理结构承受力载荷时的整体失稳或屈曲问题，并且能够计算载荷-位移曲线中存在负斜率的情况。

将静力学分析作为缓慢动力学进行分析，该项技术使用动力学影响来防止结构分叉的发生，但使用起来很困难。

15.2　几何模型

图 15-1 给出了加强筋板的横截面示意图，图 15-2 给出了加强筋板的三维模型，几何尺寸如下：板的宽度 W =1m，板的长度为 2m，加强筋之间的距离 W_1=0.18m，板的厚度为 0.005m，加强筋的高度 H_2=0.08m，加强筋的厚度为 0.002m。

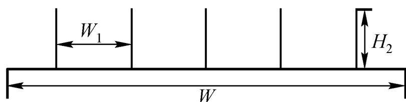


图 15-1　加强筋板的横截面示意图

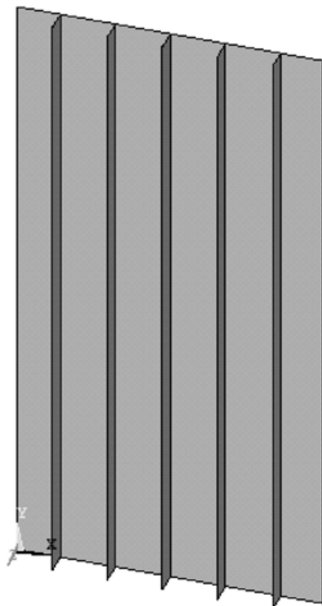




图 15-2　加强筋板的三维模型

15.3　材料的本构关系

加强筋板的弹性模型为 73GPa，泊松比为 0.33，本实例使用双线性等向强化模型模拟加强筋板，其屈服强度为 268.9GPa，切线模量为 73MPa。

15.4　单元的选择

本章实例选用 8 节点 SHELL281 单元模拟整个结构。

15.5　边界条件及载荷

固有约束加强筋板底部的三个方向的平动自由度，在加强筋板的顶部施加均匀压力 90kPa。

15.6　GUI 操作

15.6.1　前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 buckling，单击“OK”按钮。

2. 定义参数

在命令输入窗口中输入，W=1，L=2，W1=0.18，H1=0.005，H2=0.08，H3=0.002。

3. 选择单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Shell，然后在右边选择 3D 8 node 281 单元，单击“OK”按钮，返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

4. 定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 15-3 所示，输入 EX=7.3E10、PRXY=0.33，单击“OK”按钮，关闭对话框继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，弹出双线性等向强化模型定义面板，如图 15-4 所示，输入屈服应力=268.8E6、切线模量为 7.3E7，单击“OK”按钮，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

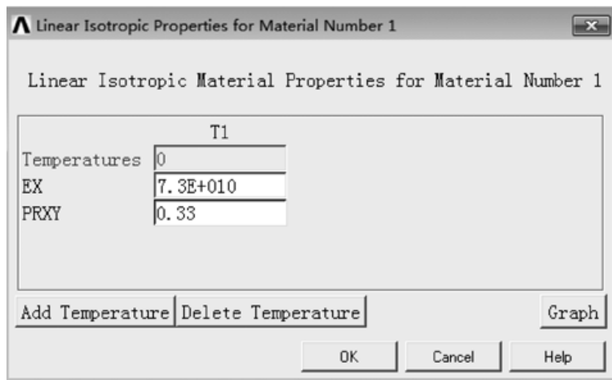


图 15-3　各向同性线弹材料定义面板

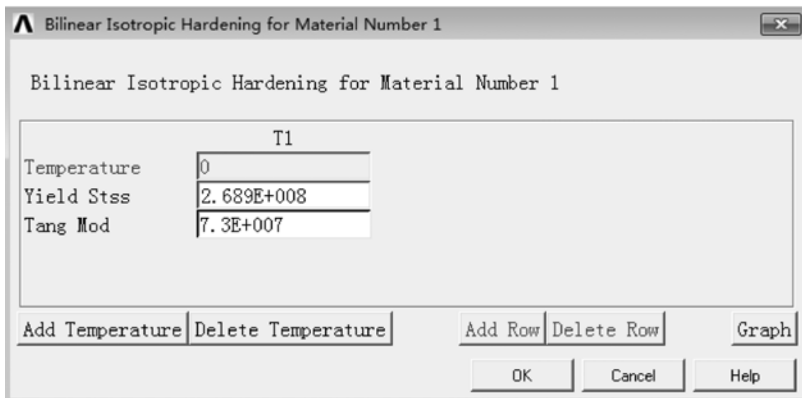


图 15-4　双线性等向强化模型定义面板

5. 定义截面信息

（1）定义板的截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add/Edit，弹出的壳体截面设置面板，如图 15-5 所示，按照图 15-5 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

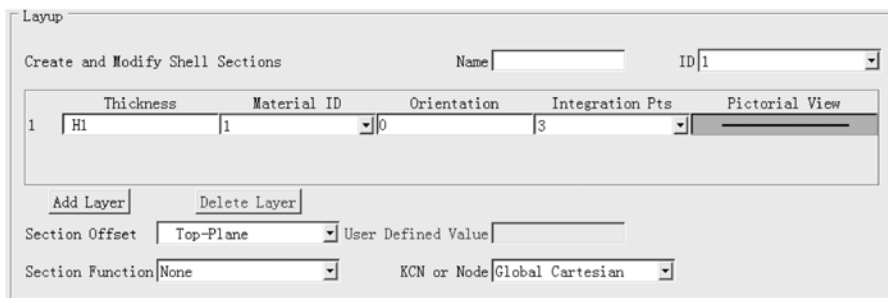


图 15-5 壳体截面设置面板

（2）定义加强筋的截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Shell→Lay-up→Add/Edit，弹出壳体截面设置面板，如图 15-5 所示，将 ID 号修改为 2，厚度修改为 H3，其他保持不变，单击“OK”按钮。

6．建立模型

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出在激活坐标系中定义关键点面板，如图 15-6 所示，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=0、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2，X=(W-4*W1)/2、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=(W-4*W1)/2、Y=0、Z=H2，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X=(W-4*W1)/2+W1、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X=(W-4*W1)/2+W1、Y=0、Z=H2，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6，X=(W-4*W1)/2+W1+W1、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 7，X=(W-4*W1)/2+W1+W1、Y=0、Z=H2，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 8，X=(W-4*W1)/2+W1+W1+W1、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 9，X=(W-4*W1)/2+W1+W1+W1、Y=0、Z=H2，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 10，X=(W-4*W1)/2+W1+W1+ W1+W1、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 11，X=(W-4*W1)/2+W1+W1+W1+W1、Y=0、Z=H2，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 12，X=W、Y=0、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 13，X=0、Y=L、Z=0，单击“OK”按钮。

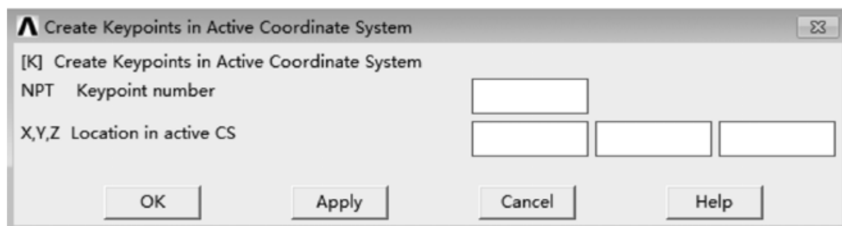


图 15-6 在激活坐标系中定义关键点面板

（2）定义直线

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→In Active Coord，弹出拾取

对话框，拾取关键点 1 和 2，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 2 和 3，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 2 和 4，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 4 和 5，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 4 和 6，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 6 和 7，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 6 和 8，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 8 和 9，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 8 和 10，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 10 和 11，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 10 和 12，单击“Apply”按钮；继续拾取关键点 1 和 13，单击“OK”按钮。

（3）将直线拖拉成面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→Along Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L2，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L3，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L4，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L5，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L6；单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L7，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L8，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L9，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L10，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“Apply”按钮；拾取线 L11，单击“Apply”按钮；再拾取线 L12，单击“OK”按钮。

（4）合并所有实体

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items，在弹出的对话框中设置合并类型（Type of item to be merge）为所有（All）。

7．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置网格总体尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 15-7 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 15-8 所示。



图 15-7　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

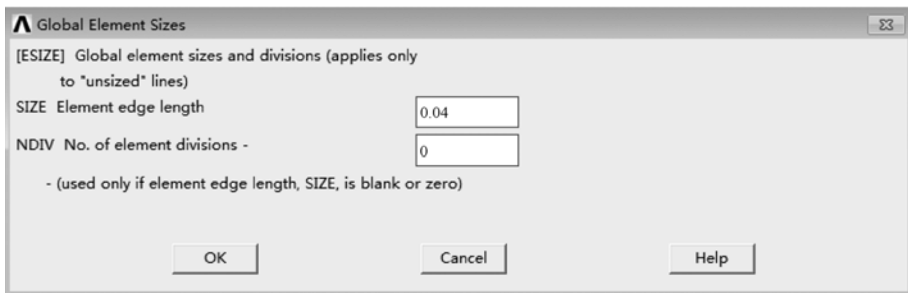


图 15-8　总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项，单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.04，单击“OK”按钮。

（3）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 15-9 所示，按照图 15-9 进行设置，单击“OK”按钮。

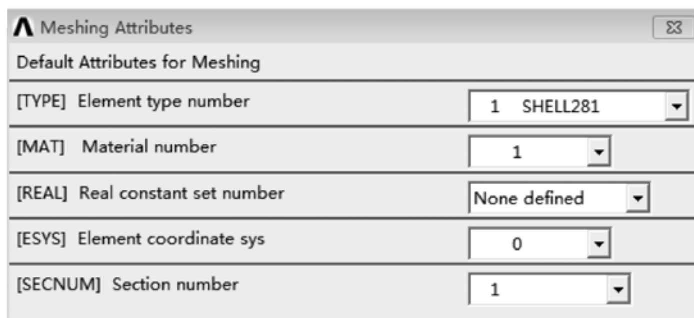


图 15-9 网格属性设置面板

（4）划分板网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取板的面 A1，A3，A5，A7，A9 和 A11，单击“OK”按钮。

（5）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出如图 15-9 所示的网格属性设置面板，将截面号设置为 2，其他设置保持不变，单击“OK”按钮。

（6）划分加强筋网格

选择网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取板的面 A2，A4，A6，A8 和 A10，单击“OK”按钮。

15.6.2 静力学求解

1. 设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 15-10 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

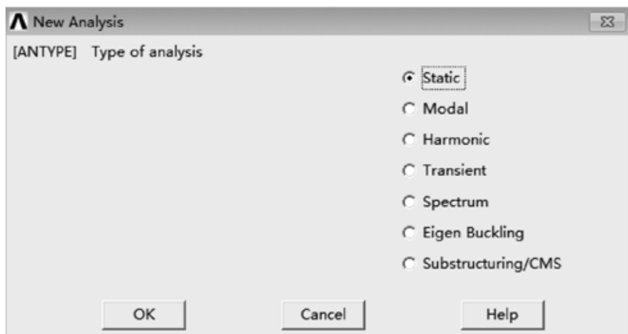


图 15-10 分析类型设置面板

（2）激活预应力

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出求解控制面板的基本选项设置面板，如图 15-11 所示，勾选计算预应力选项（Calculate prestress effects），单击“OK”按钮。

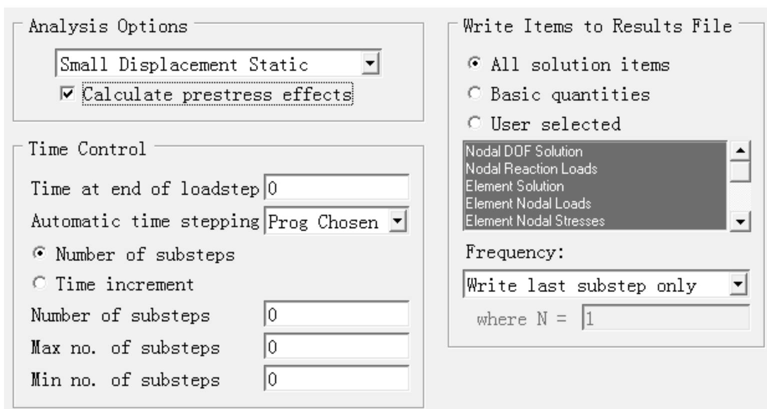


图 15-11　求解控制面板的基本选项设置面板

2．定义边界条件

（1）选择底端所有节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 15-12 所示，按照图 15-12 进行设置，单击“OK”按钮。

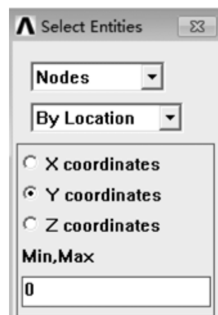


图 15-12　选择实体设置面板

（2）完全约束所选节点

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→ Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，在弹出的对话框中选择约束类型为 UX、UY 和 UZ，单击“OK”按钮。

（3）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

3．定义压力载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines，弹出拾取对话框，拾取加强筋板的顶端的线 L13，L26，L16，L29，L18，L32，L20，L35，L22，L38 和 L24，单击“OK”按钮，弹出在线上施加压力的设置面板，如图 15-13 所示，输入压力值为 9E4，单击“OK”按钮。



图 15-13　在线上施加压力的设置面板

4．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

15.6.3 特征值屈曲分析

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 15-14 所示，选择特征值屈曲分析（Eigen Buckling），单击“OK”按钮。

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出的特征值屈曲分析选项设置面板，如图 15-15 所示，输入提出的模态阶数为 10，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

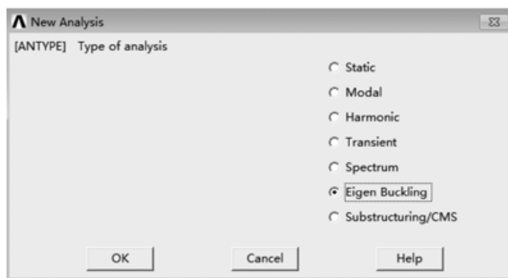


图 15-14 分析类型设置面板

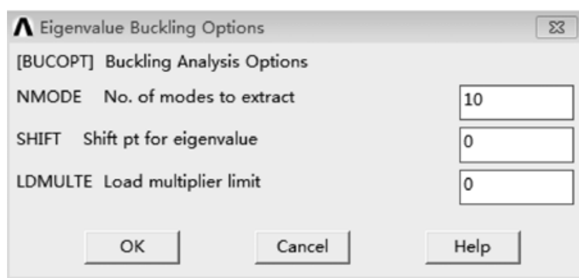


图 15-15 特征值屈曲分析选项设置面板

2．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）扩展模态设置选项

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→ExpansionPass→Single Expand→Expand Modes，弹出扩展模态设置面板，如图 15-16 所示，输入扩展的模态阶数为 10，单击“OK”按钮。

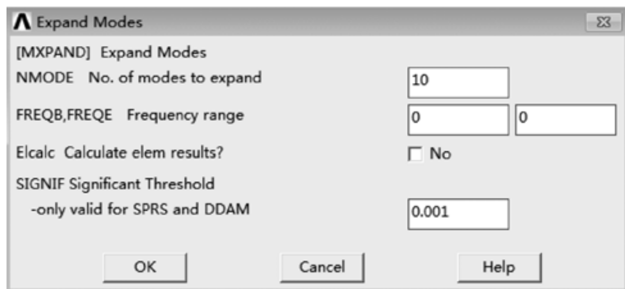


图 15-16 扩展模态设置面板

3．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

15.6.4 添加初始缺陷

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Update Geom，弹出施加初始缺陷设置面板，如图 15-17 所示，按照图 15-17 进行设置，单击“Apply”按钮；重新输入子步 2，单击“Apply”按钮；重新输入子步 3，单击“Apply”按钮；重新输入子步 4，单击“Apply”按钮；重新输入子步 5，单击“Apply”按钮；重新输入子步 6，单击“Apply”按钮；重新输入子步 7，单击“Apply”按钮；重新输入子步 8，单击“Apply”按钮；重新输入子步 9，单击“Apply”按钮；重新输入子步 10，单击“OK”按钮。

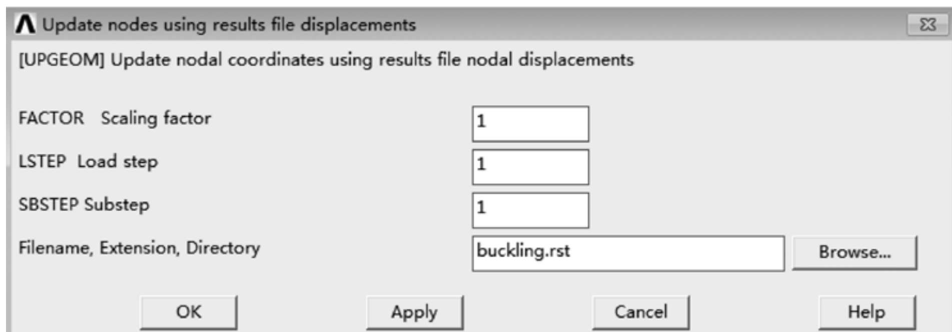


图 15-17　施加初始缺陷面板

15.6.5 非线性屈曲分析

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 15-14 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 15-18 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

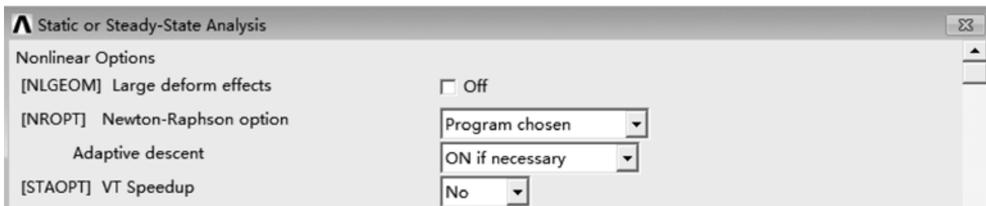


图 15-18　静态分析选项设置面板

2．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 15-19 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 100，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 1000 和最小子步数（Minmum no. of substeps）为 10。

（3）关闭预测器

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Predictor，弹出预测器设置面板，如图 15-20 所示，选择关闭预测器，单击“OK”按钮。

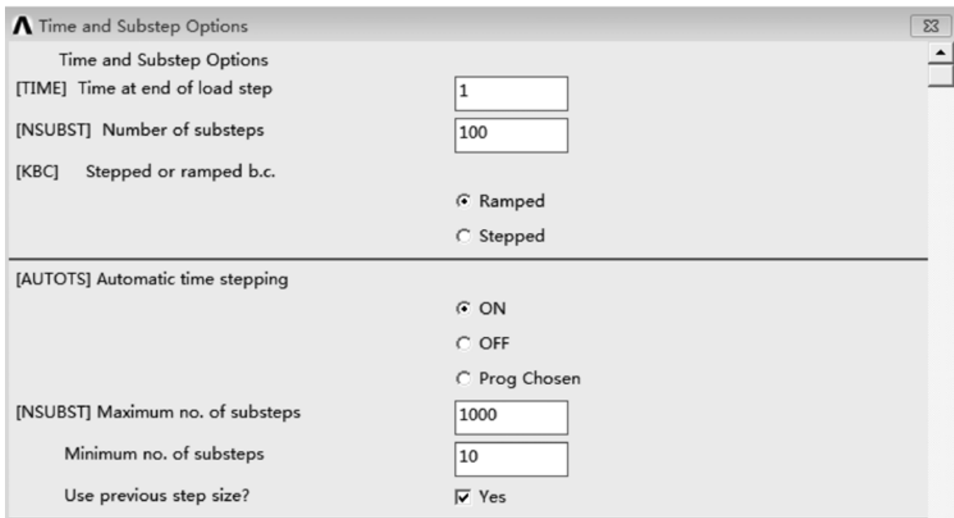


图 15-19 时间和子步选项设置面板

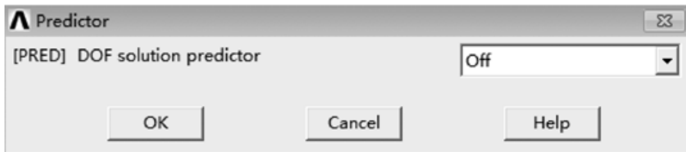


图 15-20 预测器设置面板

（4）设置重启动

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Restart Control，弹出重启动设置面板，如图 15-21 所示，设置重启动动作（Action）为定义 （Define），重启载荷步（Load Step）为全部子步（All），文件写入频率（File write frequency）为全部写入（All），单击“OK”按钮。

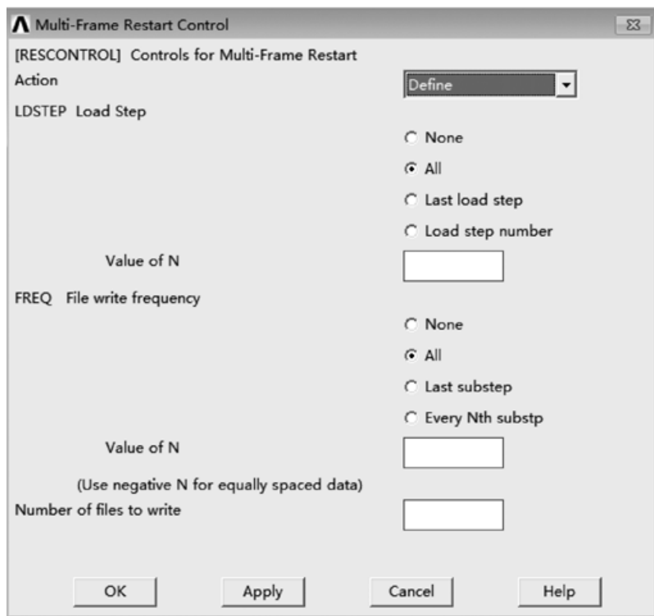


图 15-21　重启动设置面板

3．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。由于求解中结构的稳定性发生变化，因此终止，需要进行重启动分析并在重启动中使用非线性稳定求解技术。

4．重启动求解

（1）激活重启动

GUI：单击 Main Menu→Analysis Type→Restart，弹出重启动设置面板，如图 15-22 所示，设置子步号码为 17，单击“OK”按钮。

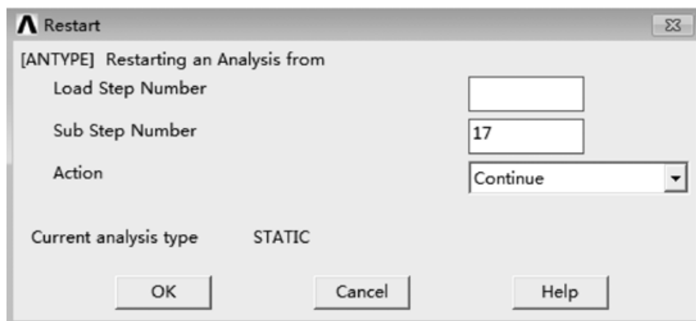


图 15-22　重启动设置面板

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 15-19 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 100，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步

（ON），输入最大子步数（Maximum no. of substeps）为 10000 和最小子步数（Minimum no. of substeps）为 10。

（3）设置非线性稳定求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Advanced NL，弹出求解控制面板中的高级非线性设置子面板，如图 15-23 所示，设置非线性稳定技术（Stabilization）为常数稳定方法（Constant Stabilization），控制方法为能量耗散方法（Energy dissipation），耗散系数为 0.002，设置完毕，单击“OK”按钮。

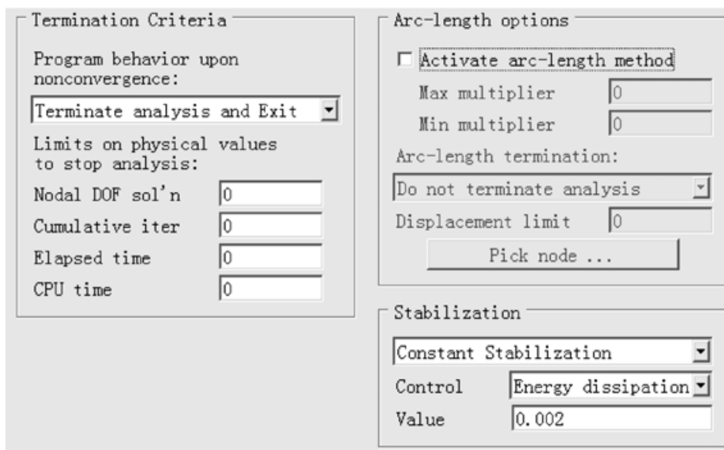


图 15-23 求解控制面板中高级非线性设置子面板

（4）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

15.6.6 后处理

图 15-24～图 15-29 分别给出了不同加载比例时的等效应力云图，由图 15-24～图 15-29 可知，非线性屈曲求解到发散时的最大等效应力为 281MPa。

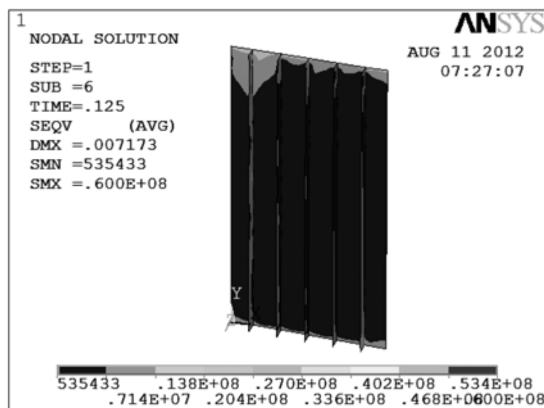


图 15-24 加载 12.5%时的等效应力云图

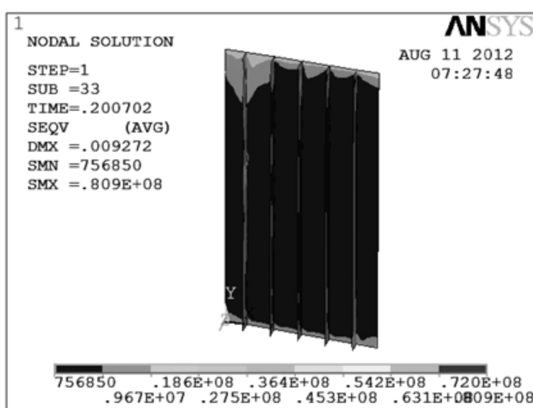


图 15-25 加载 20%时的等效应力云图

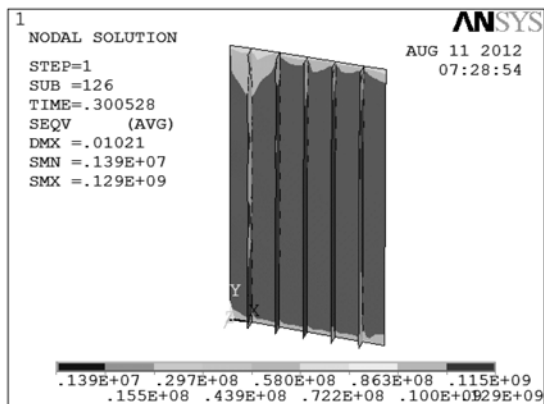


图 15-26　加载 30%时的等效应力云图

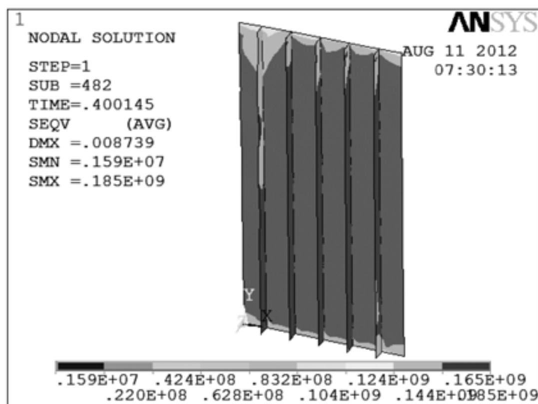


图 15-27　加载 40%时的等效应力云图

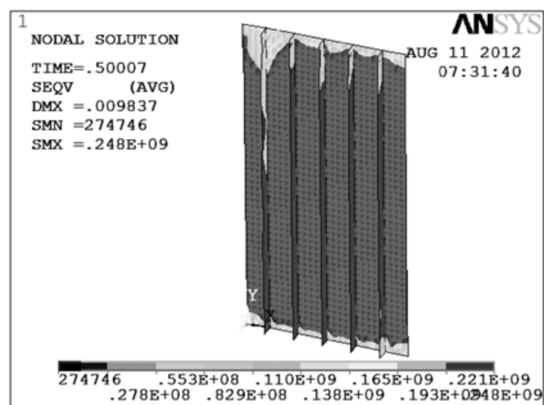


图 15-28　加载 50%时的等效应力云图

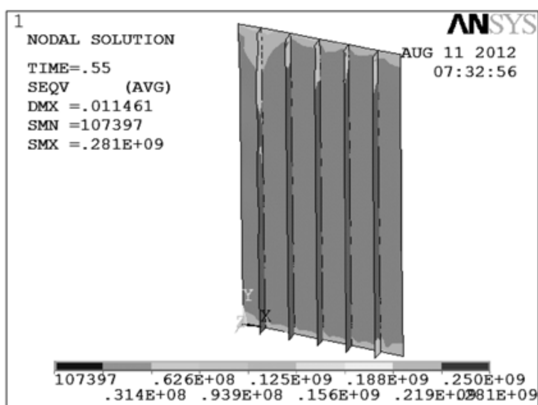


图 15-29　加载 55%时的等效应力云图

图 15-30～图 15-35 分别给出了不同加载比例时的位移云图，由图 15-30～图 15-35 可知，非线性屈曲求解过程中的最大位移先增大后减小。

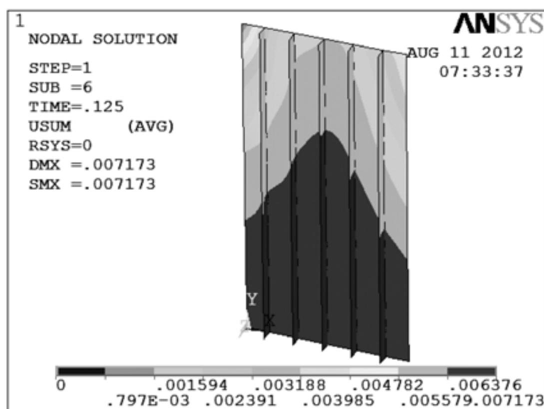


图 15-30　加载 12.5%时的位移云图

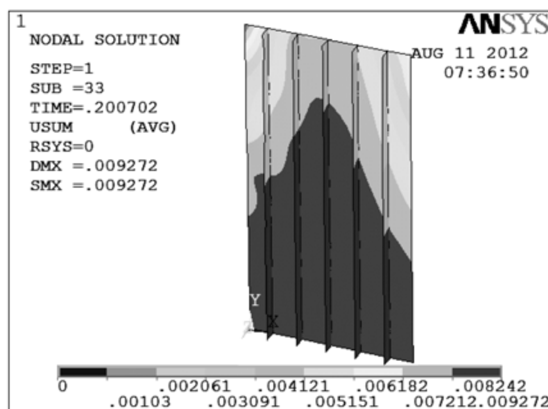


图 15-31　加载 20%时的位移云图

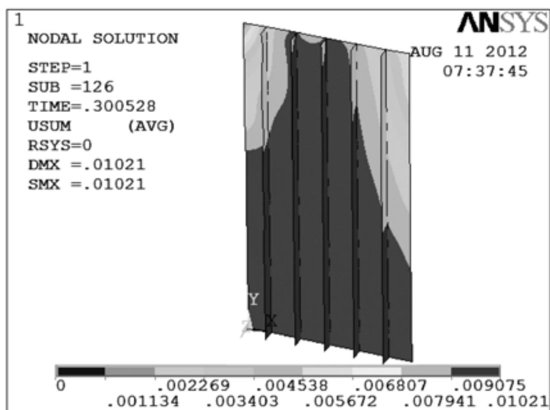


图 15-32 加载 30%时的位移云图

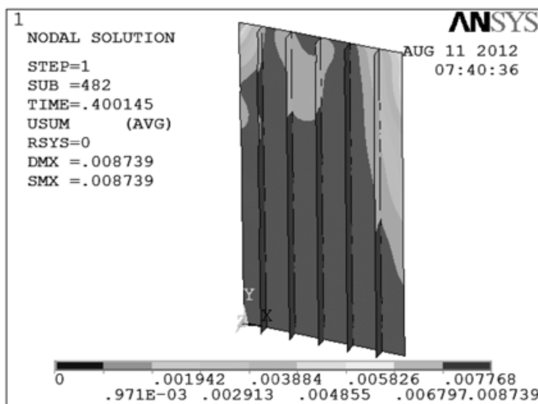


图 15-33 加载 40%时的位移云图

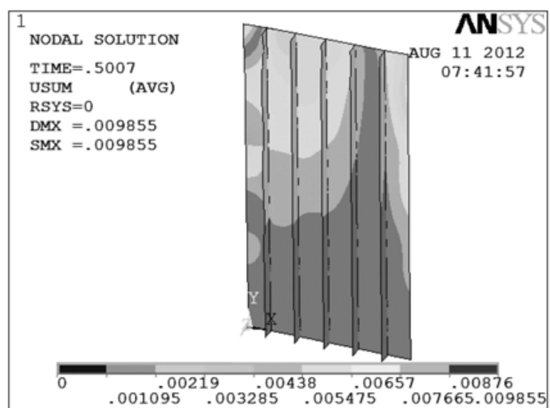


图 15-34 加载 12.5%时的位移云图

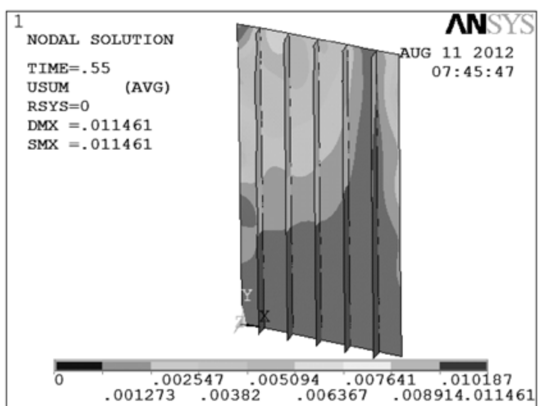


图 15-35 加载 20%时的位移云图

图 15-36 给出了位移载荷曲线提取位置示意图，图 15-37 给出了位置 1 的 *y* 方向位移与载荷的关系，由图 15-37 可知位置发生屈曲时的载荷大约为 29.7MPa，图 15-38 和图 15-39 分别给出了位置 2 和位置 3 处的 *z* 方向位移与载荷的关系，由图 15-37、图 15-38 可知，两个位置处的 *z* 方向位移随着外载先增大后减小。

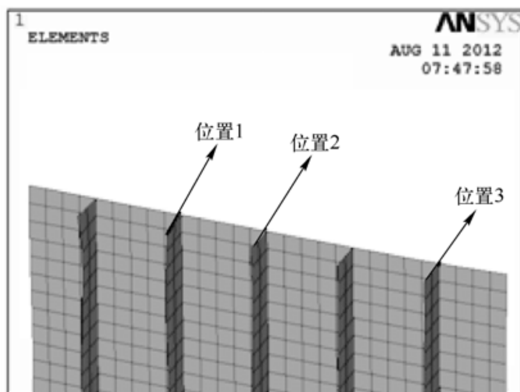


图 15-36 位移载荷曲线提取位置示意图

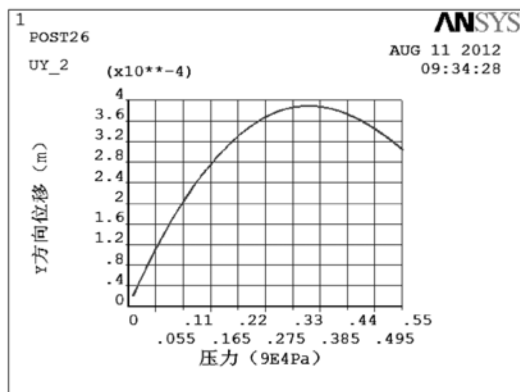


图 15-37 位置 1 的 *y* 方向位移与载荷的关系



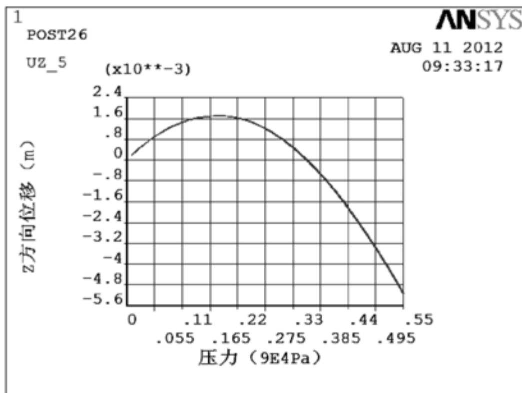


图 15-38　位置 2 的 z 方向位移与载荷的关系

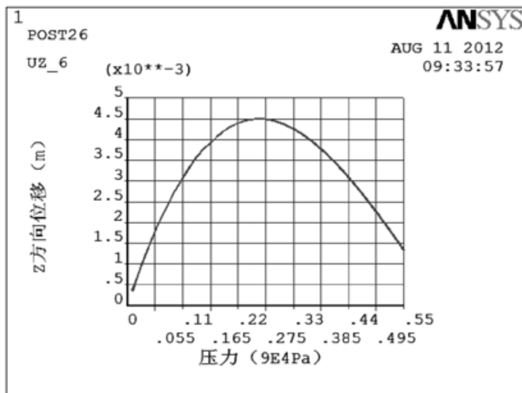


图 15-39　位置 3 的 z 方向位移与载荷的关系

15.7　命令流

```
/FILNAME, buckling,0
!进入前处理器
/PREP7
!定义参数
W=1
L=2
W1=0.18
H1=0.003
H2=0.08
H3=0.002
ET,1,SHELL281    !定义单元
MP,EX,1,73E9     !定义弹性模量
MP,PRXY,1,0.33
!设置材料模型为双线性等向强化模型
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,268.9E6,73E6,,,,
!设置壳体截面
sect,1,shell,,   !定义壳体截面号为 1
secdata, H1,1,0.0,3
secoffset,TOP    !定义壳体偏移截面为底面
seccontrol,,,, , , ,
sect,2,shell,,
secdata, H3,1,0.0,3
secoffset,TOP
seccontrol,,,, , , ,
!定义关键点
K,1,0,0
K,2,(W-4*W1)/2,0,0
```



```
K,3,(W-4*W1)/2,0,H2
K,4,(W-4*W1)/2+W1,0,0
K,5,(W-4*W1)/2+W1,0,H2
K,6,(W-4*W1)/2+W1+W1,0,0
K,7,(W-4*W1)/2+W1+W1,0,H2
K,8,(W-4*W1)/2+W1+W1+W1,0,0
K,9,(W-4*W1)/2+W1+W1+W1,0,H2
K,10,(W-4*W1)/2+W1+W1+W1+W1,0,0
K,11,(W-4*W1)/2+W1+W1+W1+W1,0,H2
K,12,W,0,0
K,13,0,L,0
!定义线
L,1,2
L,2,3
L,2,4
L,4,5
L,4,6
L,6,7
L,6,8
L,8,9
L,8,10
L,10,11
L,10,12
L,1,13
!将线拉伸成面
ADRAG,      1, , , , , ,      12
ADRAG,      2, , , , , ,      12
ADRAG,      3, , , , , ,      12
ADRAG,      4, , , , , ,      12
ADRAG,      5, , , , , ,      12
ADRAG,      6, , , , , ,      12
ADRAG,      7, , , , , ,      12
ADRAG,      8, , , , , ,      12
ADRAG,      9, , , , , ,      12
ADRAG,      10, , , , , ,     12
ADRAG,      11, , , , , ,     12
!合并所有实体
NUMMRG,ALL, , , ,LOW

ESIZE,0.04
secnum,1
amesh,1
AMESH,3
AMESH,5
AMESH,7
AMESH,9
```

```
AMESH,11

secnum,2
AMESH,2
AMESH,4
AMESH,6
AMESH,8
AMESH,10
/solu
pstres,on                              !激活预应力选项
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
NPLOT
D,ALL, , , , , ,UX,UY,UZ, , ,
ALLSEL,ALL
!定义载荷
SFL,13,PRES,9E4,
SFL,16,PRES,9E4,
SFL,19,PRES,9E4,
SFL,22,PRES,9E4,
SFL,25,PRES,9E4,
SFL,28,PRES,9E4,
SFL,31,PRES,9E4,
SFL,34,PRES,9E4,
SFL,37,PRES,9E4,
SFL,40,PRES,9E4,
SFL,43,PRES,9E4,
solve
finish
/solu
antype,buckle                          !激活屈曲分析 Buckling analysis
bucopt,lanb,10,                        !使用 block Lanczos 提取前 10 阶模态
mxpand,10,,,                           !对该 10 阶模态进行扩展
outres,all,all
solve
finish
/prep7
*do,i,1,10
upgeom,0.05,1,i,buckling,rst           !将每一阶模态添加 1/10 缺陷
*enddo
finish
/solu                                  !激活静态分析 Run static analysis
antype,static
nlgeom,on                              !激活大变形分析
outres,all,all
time,1
```



```
AUTOTS,1
nsubst,100,1000,10
pred,off                              !关闭预测器选项
RESCONTROL,DEFINE,ALL,ALL,0
solve
finish
/solu
antype,,restart,1,17                  !使用非线性稳态技术重启动分析
AUTOTS,1
nsubst,100,10000,10
stabilize,constant,energy,0.002 !使用能量选项
solve
fini
```

第 16 章　切削过程模拟

16.1　引言

切削工艺主要是通过刀具在材料表面切除多余的材料层来获得理想的工件形状、尺寸以及表面粗糙度的机械加工方法。计算机技术的飞速发展使得利用数值模拟方法来研究切削加工过程以及各种参数之间的关系成为可能。近年来，有限元方法在切削工艺中的应用表明，切削工艺和切屑形成的有限元模拟对了解切削机理、提高切削质量是很有帮助的。这种数值模拟方法适合于分析弹塑性大变形问题，包括分析与温度相关的材料性能参数和很大的应变速率问题。

随着非线性有限单元技术的发展和广泛应用，特别是在数值仿真成功地应用于工程领域之后，使得工件切削过程的数值模拟也成为可能。应用此方法可以得到比传统方法更为复杂的有限元计算模型。这些模型主要用于计算工件的残余应力、残余应变、温度分布以及预测切削力等等。模拟切削的核心问题是切屑形成问题，本章实例使用 ANSYS14.0 中的粘结区模型（CZM），成功地解决了切削分离问题，且操作简便，对于切削分析很有借鉴意义。

16.2　几何模型

如图 16-1 给出了切削分析的平面模型，该模型由加工的工件、切屑和刀具三部分组成，几何尺寸如下：L_1=0.04m，L_2=0.002，H_1=0.01m，H_2=0.002，H_3=0.009，刀具前角 α=25º，刀具后角 β=8º。

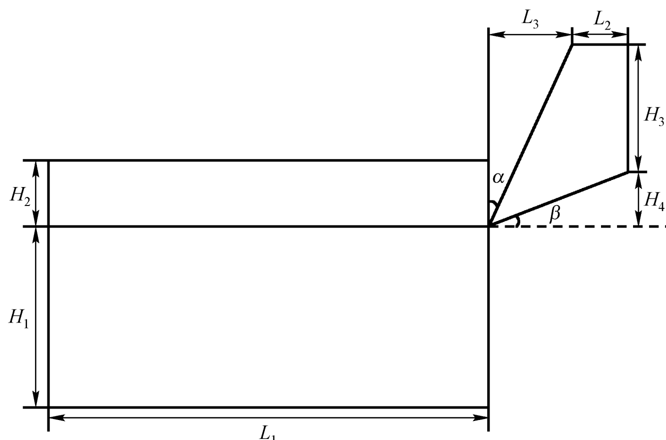


图 16-1　切削分析的平面模型



16.3 材料的本构关系

工件材料的弹性模量为 70GPa、泊松比为 0.3，发生塑性变形后的应力-应变关系符合双线性等向强化模型，其中屈服应力为 400MPa、切线模量为 15MPa。刀具的弹性模量为 210GPa、泊松比为 0.3。切削过程为 I 型开裂，因此粘结区模型只需提供三个参数：最大法向接触应力 380MPa、完成分离处的接触间隙为 0.002m、人工阻尼 5E-4。

16.4 单元的选择

本章实例选用平面单元 PLANE182，并设置为平面应变，使用接触单元 CONTA171 和目标单元 TARGE169 定义切屑和金属件之间的粘结，使用接触向导定义刀具与工件及切屑之间的接触，并假设各个接触面的摩擦因数为 0。

16.5 边界条件及载荷

完全约束工件底部两个方向的位移，固定约束刀具的竖直方向位移，施加水平位移 0.02m。

16.6 GUI 操作

16.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 machining finite element analysis，单击“OK”按钮。

2．设置角度单位为度

GUI：单击 Utility Menu→Parameters→Angular Units，弹出角度设置面板，如图 16-2 所示，设置角度单位为度（Degrees），单击“OK”按钮。

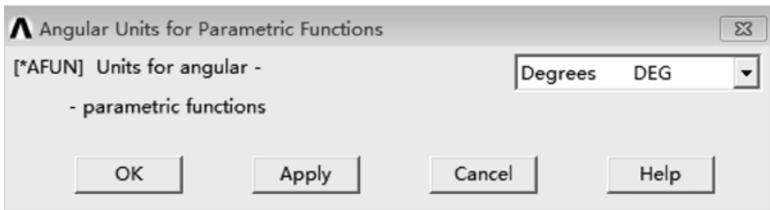


图 16-2 角度设置面板

3．定义参数

在命令窗口中输入 L1=0.04，L2=0.002，H1=0.01，H2=0.002，H3=0.009，ERFA=25，

BEITA=8，L3=(TAN(ERFA)*H3+TAN(BEITA)*TAN(ERFA)*L2)/(1−TAN(ERFA)*TAN(BEITA))，H4=TAN(BEITA)*(L2+L3)。

4．选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮；在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 4 node 182 单元，单击“Apply”按钮；继续在对话框的左边选择 Contact，在右边选择 2D Target 169，单击“Apply”按钮；继续在对话框的左边选择 Contact，在右边选择 2 node surf 171，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 PLANE182。然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置单元行为（Element behavior）为平面应变（Plane strain）；单元计算公式（Element formulation）为位移和力混合计算公式（Mixed U/P），单击“OK”按钮；返回单元类型界面，选择 CONTA171，在弹出的对话框中设置接触表面行为（Behavior of contact surface）为初始粘结接触（Bonded（initial）），单击“OK”按钮，返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮，关闭对话框。

5．定义实常数

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，单击弹出对话框中的“Add”按钮，弹出选择单元类型对话框，选择 CONTA171，单击“OK”按钮，继续单击“OK”按钮，返回定义实常数面板，单击“Close”按钮。

6．定义材料模型

（1）定义刀具材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 16−3 所示，输入 EX=2.1E11、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框。

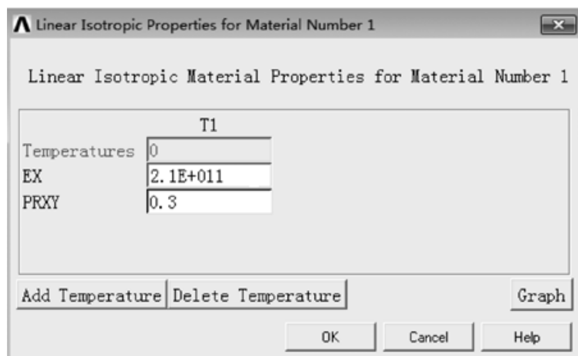


图 16−3 各向同性线弹性材料定义面板

（2）定义工件材料模型

单击 Material→New Model，在弹出的对话框框中输入 2，单击“OK”按钮。单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 16−3 所示，

输入 EX=70E9、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，弹出双线性等向强化模型定义面板，如图 16-4 所示，输入屈服应力为 400E6、切线模量为 5E7，单击“OK”按钮，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。



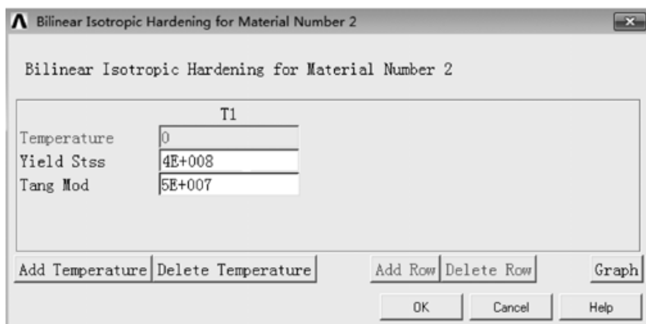


图 16-4 双线性等向强化模型定义面板

（3）定义切屑与工件之间的粘结区模型

在现有的 ANSYS 中暂不支持对该种材料模型的 GUI 操作，因此输入以下命令流：

```
TB,CZM,3,2,,CBDD
TBDATA,1,360E6,0.003,0,0,5E-4,,
```

7. 建立模型

（1）定义矩形面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出通过尺寸创建矩形的定义面板，如图 16-5 所示，输入 X1=0、X2=L1、Y1=0、Y2=H1，单击“Apply”按钮，继续输入 X1=0、X2=L1、Y1=H1、Y2=H1+H2，单击“OK”按钮。

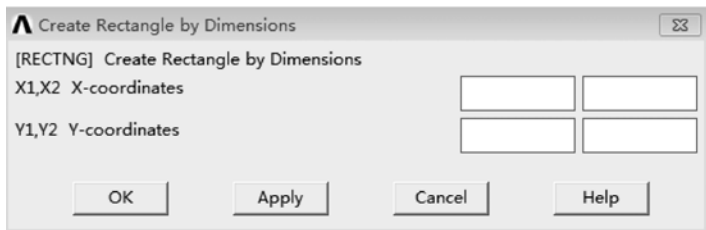


图 16-5 通过尺寸创建矩形的定义面板

（2）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出在激活坐标系中定义关键点面板，如图 16-6 所示，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 20，在激活的坐标系中输入 X=L1、Y=H1、Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 21，X=L1+L2+L3、Y=H4+H1、Z=0，单击“OK”按钮，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 22，X=L1+L2+L3、Y=H4+H1+H3、Z=0，单击“OK”按钮，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 23，X=L1+L3、Y=H4+H1+H3、Z=0，单击“OK”按钮。

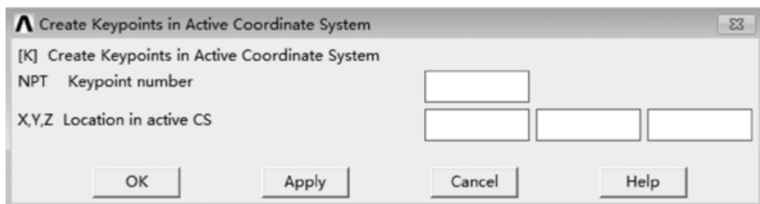


图 16-6 在激活坐标系中定义关键点面板

（3）通过关键点定义面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，弹出拾取对话框，拾取关键点 20，21，22 和 23，单击“OK”按钮。

8. 网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置网格总体尺寸

选择的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 16-7 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 16-8 所示。



图 16-7 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

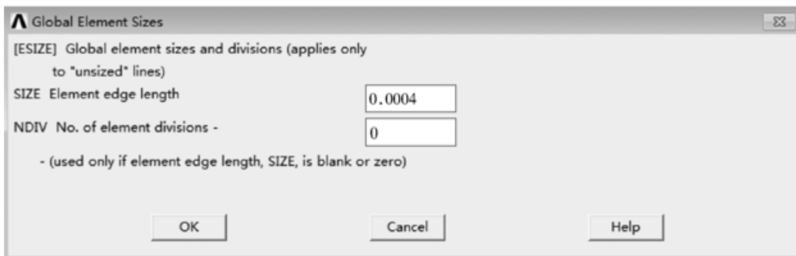


图 16-8 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.0004，单击“OK”按钮。

（3）划分工件网格

1）定义网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 16-9 所示，按照图 16-9 进行设置，单击“OK”按钮。

2）划分工件

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取工件的面 A1 和 A2，单击“OK”按钮。

（4）划分刀具网格

1）定义网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按

钮，弹出网格属性设置面板，如图 16-9 所示，将材料号修改为 1，其他保存不变，单击“OK”按钮。

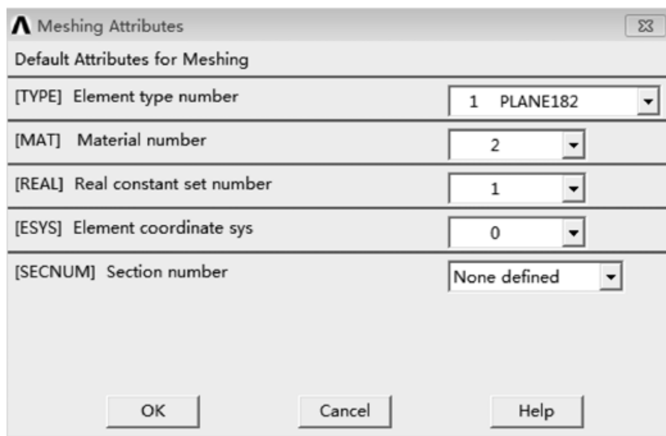


图 16-9 网格属性设置面板

2）划分刀具

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取刀具的面 A3，单击“OK”按钮。

（5）划分切屑与工件之间的接触对

1）定义网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 16-10 所示，按照图 16-10 进行设置，单击“OK”按钮。

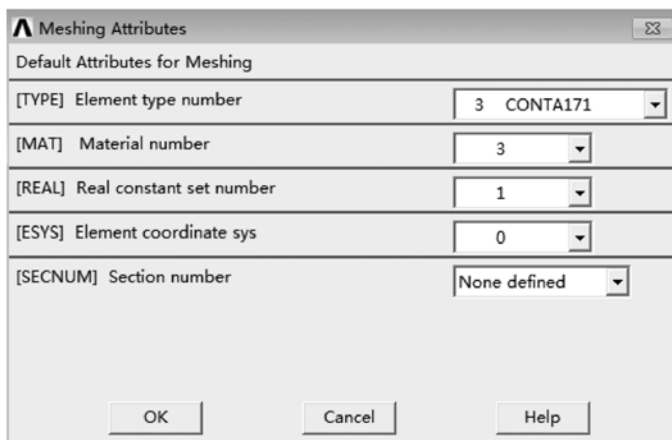


图 16-10 网格属性设置面板

2）定义接触单元

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取工件上的线 L3，单击“OK”按钮。

3）定义网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）

按钮，弹出网格属性设置面板，如图 16-10 所示，将单元修改为目标单元 169，其他保存不变，单击“OK”按钮。

4）定义目标单元

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取工件上的线 L5，单击“OK”按钮。

9．定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出接触管理器面板，如图 16-11 所示。

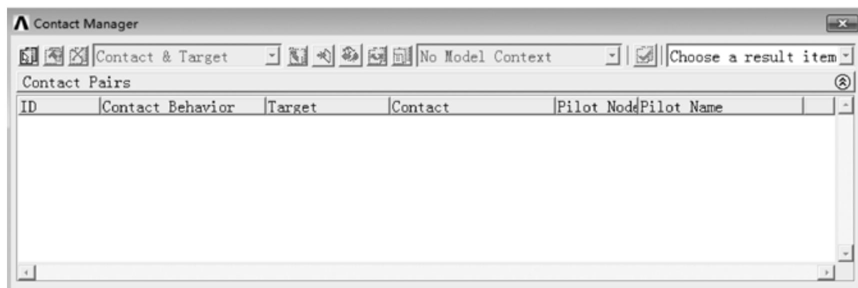


图 16-11　接触管理器面板

（2）创建刀具与工件之间的接触对

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 16-12 所示，在该面板中设置目标面为线（Lines），设置目标单元类型为柔性体（Flexible），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取刀具线 L12，单击“Apply”按钮；然后单击图 16-12 所示的“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 16-13 所示，在该面板中设置接触面为线（Lines），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取线 L5，单击“Apply”按钮；单击图 16-13 中的“Next”按钮，在弹出的创建接触对面板中输入摩擦因数（Coefficient of Friction）为 0，单击“Create”按钮来创建接触对。另外一个接触对的创建方法相似，只需把目标线修改为 L9，接触线修改为 L3 即可，具体操作可参见本章视频。

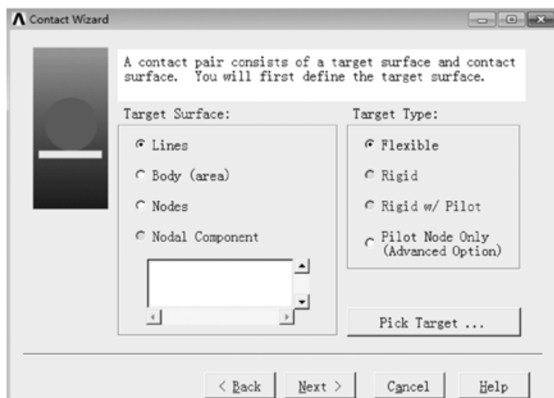


图 16-12　目标面及目标单元类型设置面板

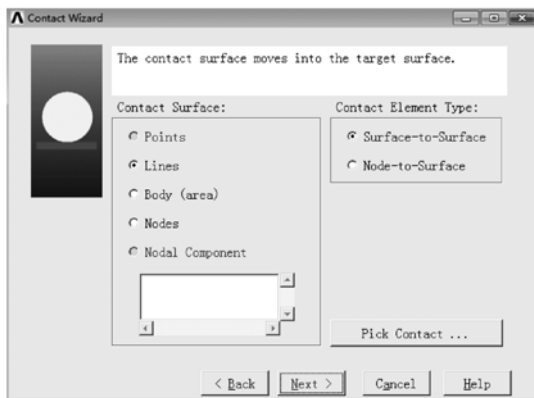


图 16-13　接触面及接触单元类型设置面板

16.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 16-14 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

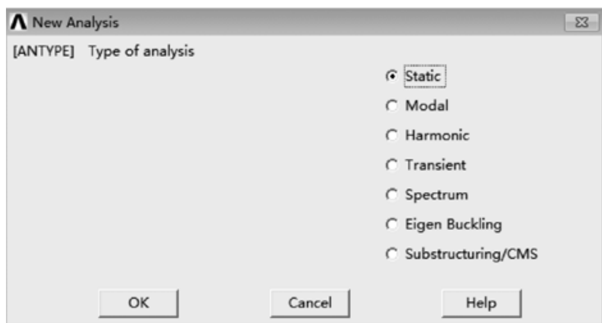


图 16-14 分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 16-15 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

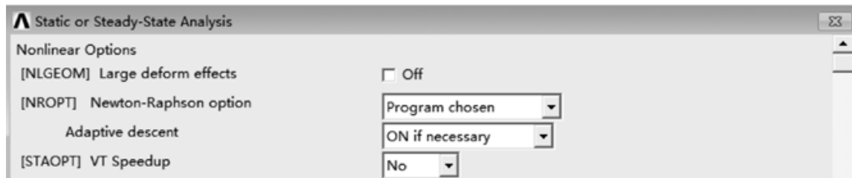


图 16-15 静态分析选项设置面板

2．定义边界条件

（1）固定约束工件底端

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines，弹出拾取对话框，拾取线 L1，单击“OK”按钮，在弹出的约束线自由度设置面板中选择约束类型（DOFs to be contrained）为 All DOF，单击“OK”按钮。

（2）约束刀具的竖直方向位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出拾取对话框，拾取刀具面 A3，单击“OK”按钮，在弹出的约束面自由度设置面板中选择约束类型为 UY，单击“OK”按钮。

3．定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出拾取对话框，拾取刀具面 A3，单击“OK”按钮，在弹出的约束面自由度设置面

板中选择约束类型为 UZ，并输入位移值为-0.02，单击“OK”按钮。

4．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，弹出计算结果输出控制面板，如图 16-16 所示，选择 Every substep，单击“OK”按钮。

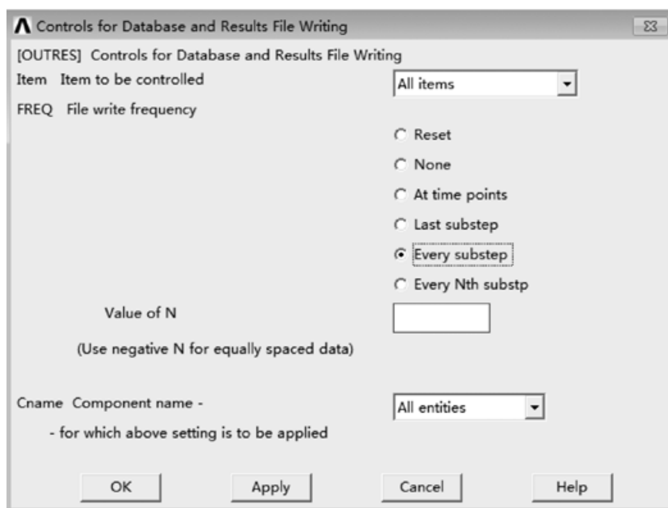


图 16-16　计算结果输出控制面板

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 16-17 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 600，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），其他保持默认，单击“OK”按钮。



图 16-17　时间和子步选项设置面板

（3）激活预测器

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Predictor，弹出的预测器

设置面板，如图 16-18 所示，按照图 16-18 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

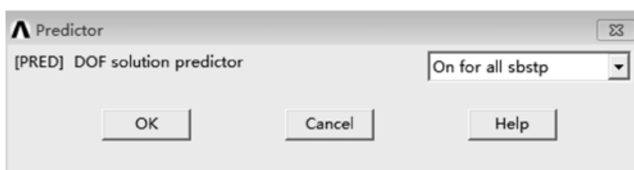


图 16-18 预测器设置面板

5. 求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

16.6.3 后处理

图 16-19～图 16-24 分别给出了切削过程中不同时间的等效应力云图，由图 16-19～图 16-24 可知，粘结区模型可以很好地模拟刀具与切屑的分离现象，并且最大等效应力发生在与刀尖相接处的切屑处，最大值为 481MPa。

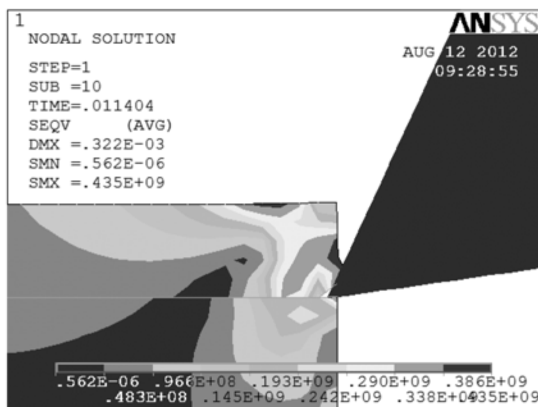


图 16-19 子步为 10 时的等效应力云图

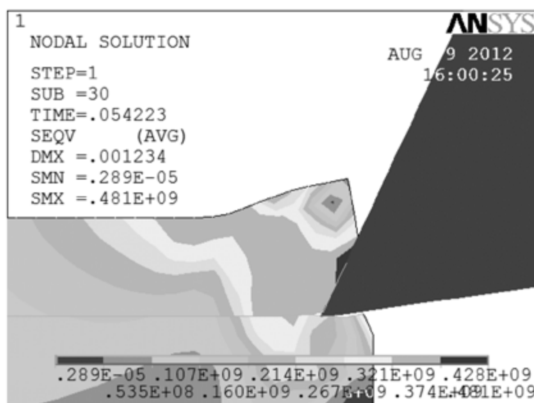


图 16-20 子步为 30 时的等效应力云图

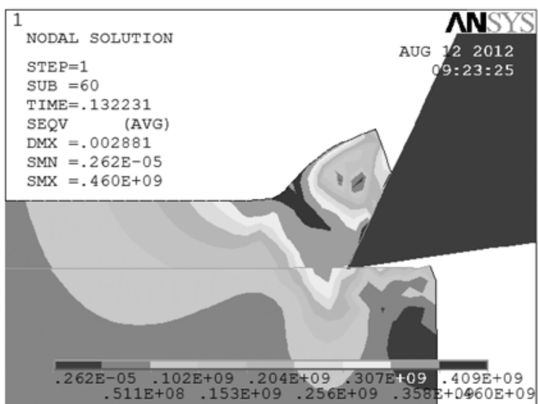


图 16-21 子步为 60 时的等效应力云图

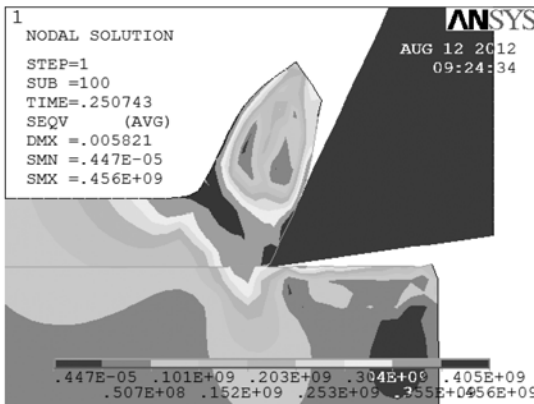


图 16-22 子步为 100 时的等效应力云图



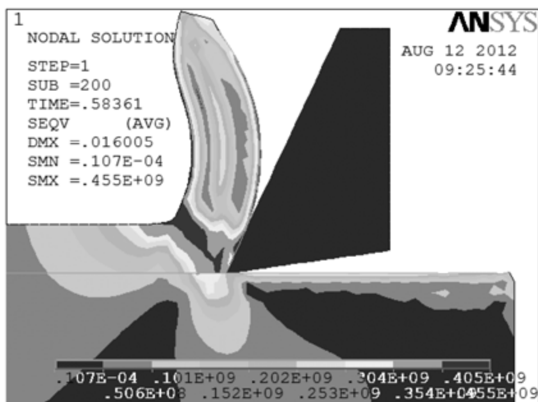


图 16-23　子步为 200 时的等效应力云图

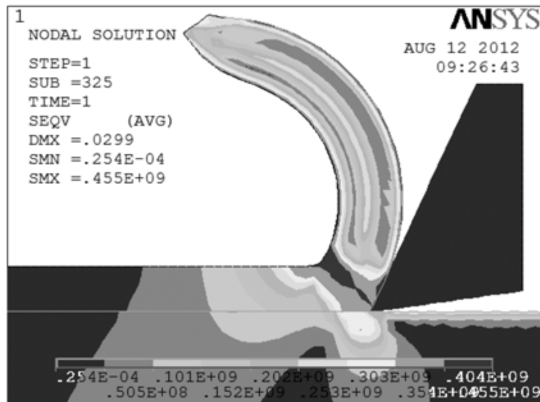


图 16-24　子步为 325 时的等效应力云图

16.7　命令流

```
/FILNAME,Machining finite element analysis,0
!进入前处理器
/PREP7
*AFUN,DEG !声明角度单位为度
!定义参数
L1=0.04
L2=0.002
H1=0.01
H2=0.002
H3=0.009
ERFA=25
BEITA=8
L3=(TAN(ERFA)*H3+TAN(BEITA)*TAN(ERFA)*L2)/(1-TAN(ERFA)*TAN(BEITA))
H4=TAN(BEITA)*(L2+L3)
ET,1,PLANE182   !定义平面单元
ET,2,TARGE169   !定义目标单元
ET,3,CONTA171   !定义接触单元
KEYOPT,1,3,2     !设置 PLANE182 为平面应变
KEYOPT,1,6,1     !设置 PLANE182 单元采用力/位移混合算法
KEYOPT,3,12,6   !设置接触单元 171 的接触类型为初始粘结
R,1,,,, ,,
!定义刀具材料参数
MP,EX,1,210e9
MP,PRXY,1,0.3
!定义切削金属的材料模型
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,70E9
MPDATA,PRXY,2,,0.3
```



```
TB,BISO,2,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,400E6,5E7,,,,
!定义粘结区模型
TB,CZM,3,2,,CBDD
TBDATA,1,360E6,0.003,0,0,5E-4,,
!建立模型
RECTNG,0,L1,0,H1,   !定义长方形
RECTNG,0,L1,H1,H1+H2,
!定义关键点
K,20,L1,H1,0
K,21,L1+L2+L3,H4+H1,0
K,22,L1+L2+L3,H4+H1+H3,0
K,23,L1+L3,H4+H1+H3,0
!由关键点建立面
A,20,21,22,23

ESIZE,0.0004
MAT,2
AMESH,1
AMESH,2
MAT,1
AMESH,3

TYPE,    2
MAT,     3
REAL,    1
ESYS,    0
SECNUM,

LMESH,   3
TYPE,    3
LMESH, 5
!使用接触向导定义刀具与工件之间的接触
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,4,169
```

```
ET,5,172
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
LSEL,S,,,12
CM,_TARGET,LINE
TYPE,4
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
LSEL,S,,,5
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,5
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
```

```
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!*
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,6,169
ET,7,172
KEYOPT,7,9,0
KEYOPT,7,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
LSEL,S,,,9
CM,_TARGET,LINE
TYPE,6
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
LSEL,S,,,3
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,7
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
```



```
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/MREP,EPLOT
!进入求解器
/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DL,1 ,,ALL,
DA,3,UY,
DA,3,UX,-0.04

OUTRES,ALL,ALL,
TIME,1
AUTOTS,1
NSUBST,600,,,1
KBC,0
PRED,ON,,ON
solve
```



第 17 章 金属杆冲击刚性墙分析

17.1 引言

本章实例以模拟三维金属杆撞击刚性墙为例，详细介绍使用冲击约束来模拟非线性瞬态动力学接触问题。本章实例联合使用时间积分方法和接触算法，并使用弹塑性材料模型验证了有限元法求解冲击问题的可行性。由于惯性力将严重影响接触问题的收敛性，因此进行瞬态动力学接触分析非常具有挑战性。

17.2 几何模型

如图 17-1 所示为一圆截面的金属杆撞击刚性墙的力学模型简图，几何尺寸如下：金属杆的初始长度 H =0.0324m，金属杆的直径 d =0.0064m，金属杆和刚性墙的初始间隙 δ =0.001m，正方形刚性强的边长 L =0.01m。

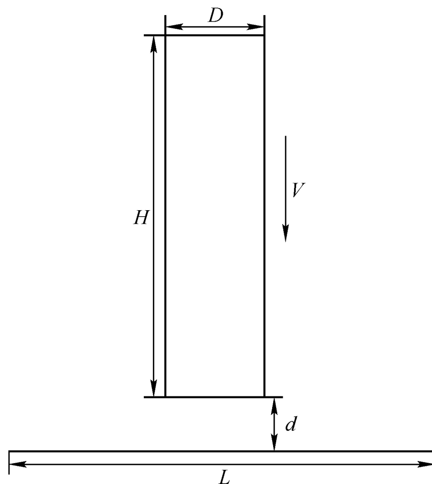


图 17-1 金属杆撞击刚性墙的力学模型

17.3 材料的本构关系

金属杆的弹性模量为 117GPa 泊松比为 0.35，金属杆的弹塑性应力-应变关系为双线性等向强化模型，其中屈服应力为 400MPa、切线模量为 100MPa、密度为 8930kg/m^3。

17.4 单元的选择

本章实例选用 SOLID185 模拟金属杆，并使用接触向导完成金属杆与刚性强之间的刚-柔接触。

17.5 边界条件及载荷

约束刚性墙的六个方向的位移，在金属杆上仅施加初始轴向速度 V =227m/s。

17.6 GUI 操作

17.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 ringforging，单击“OK”按钮。

2．定义参数

在命令输入窗口中输入：H= 32.4E-3，D=0.0064，DERTA=0.001，L=0.02。

3．选择单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 20 node 186 单元，单击“OK”按钮。

4．定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 17-2 所示，输入 EX=1.17E11、PRXY=0.35，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→

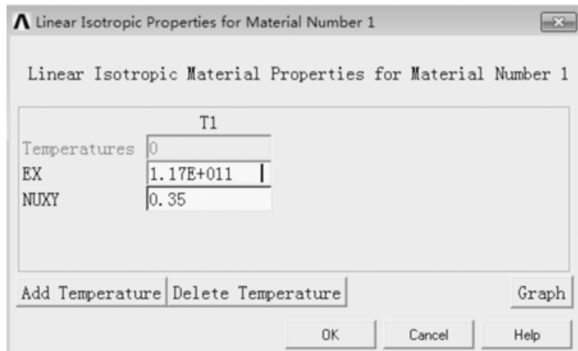


图 17-2　所示各向同性线弹性材料定义面板

Mises Plasticity→Bilinear，弹出双线性等向强化材料模型的定义面板，如图 17-3 所示，输入屈服应力为 4E8、切线模量为 1E8，继续单击 Structural→Density，弹出材料密度定义面板，如图 17-4 所示，输入密度为 8930，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

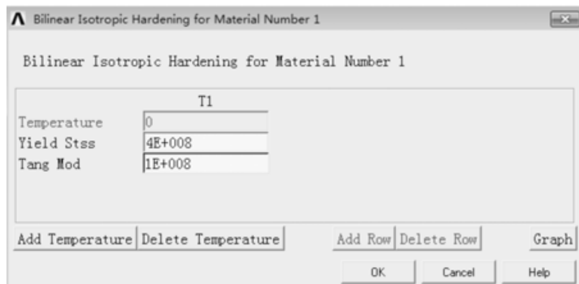


图 17-3 双线性等向强化材料模型的定义面板

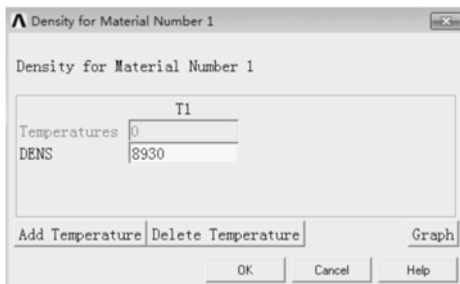


图 17-4 材料密度的定义面板

5．建立模型

（1）定义圆柱体

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By Dimensions，弹出创建圆柱体定义面板，如图 17-5 所示，按照图 17-5 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

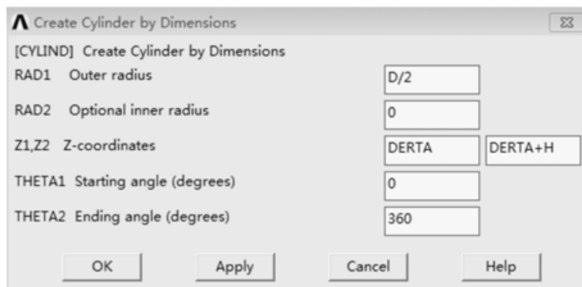


图 17-5 创建圆柱体定义面板

（2）定义正方形

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出创建矩形定义面板，如图 17-6 所示，输入 X1=−L/2、X2=L/2、Y1=−L/2、Y2=L/2，输入完毕，单击“OK”按钮。

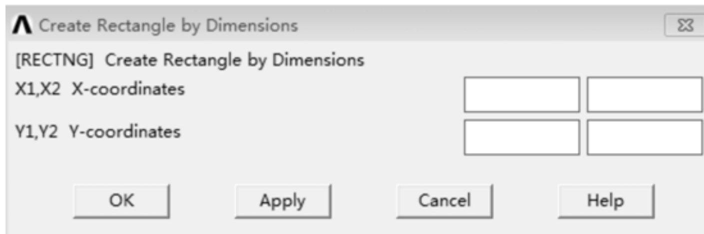


图 17-6 创建矩形定义面板

6．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 17-7 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 17-8 所示。



图 17-7 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

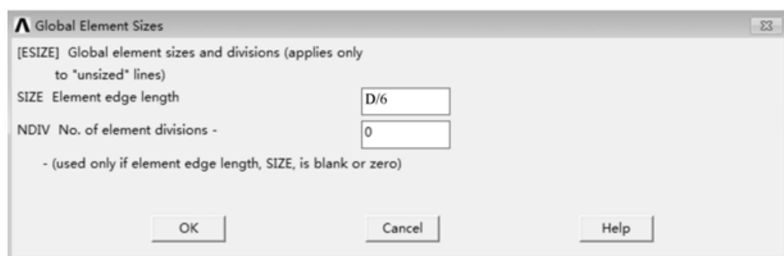


图 17-8 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 D/6，单击“OK”按钮。

（3）设置网格划分方法

设置网格形状为 Hex/Wedge，划分方法为 Sweep。

（4）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取圆柱形金属杆，单击“OK”按钮。

7．定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出接触管理器面板，如图 17-9 所示。

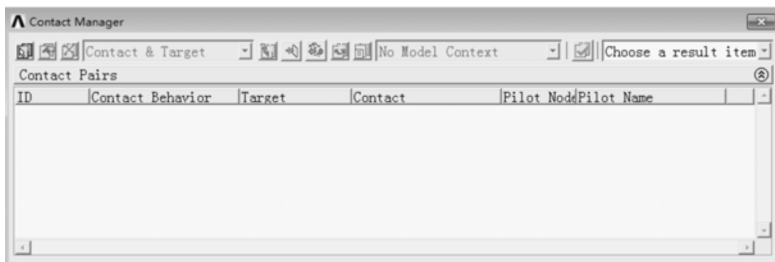


图 17-9 接触管理器面板

（2）创建圆柱子弹底面与刚性墙之间的接触对

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 17-10 所示，在该面板中设置目标面为面（Areas），设置目标单元类型为带控制节点的刚体（Rigid w/Pilot），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取刚性强面 A5，单击

"Apply"按钮，然后单击图 17-10 所示的"Next"按钮，弹出设置刚体控制节点的位置面板，图 17-11 所示，在面板中选择拾取存在的自由关键点（Pick existing free keypoint...）作为刚体控制节点，单击"Pick Entity"按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 11，单击"Apply"按钮。单击图 17-11 所示的"Next"按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，在该面板中设置接触面为面（Areas），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取面 A1，单击"Apply"按钮。单击图 17-12 中的"Next"按钮，弹出创建接触对面板，在摩擦因数（Coefficient of Friction）中输入 0，单击"Optional settings"按钮，弹出接触属性定义面板，单击"Misc"按钮，弹出接触属性其他选项设置面板，如图 17-13 所示设置单元时间增量为使用冲击约束，单击"OK"按钮，返回创建接触对面板，单击"Create"按钮来创建接触对。检查接触对法向是否正确，经过查看不需要将目标单元的法向反转，单击"OK"按钮完成目标单元的法向反转。





图 17-10　目标面及目标单元类型设置面板

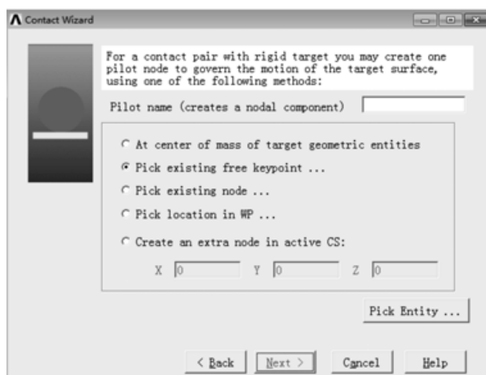


图 17-11　设置刚体控制节点的位置面板

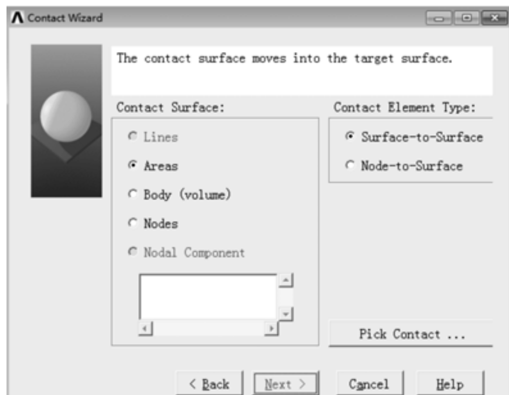


图 17-12　接触面及接触单元类型设置面板

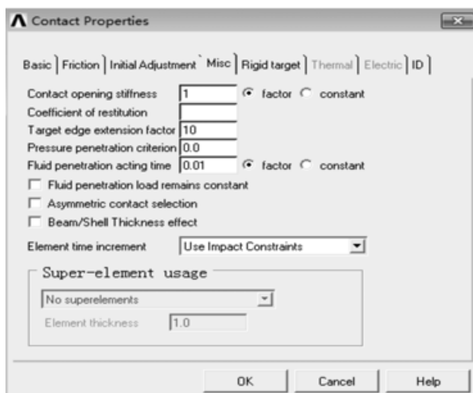


图 17-13　接触属性其他选项设置面板

17.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活瞬态动力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面

板，如图 17-14 所示，选择瞬态动力学分析（Transient），单击“OK”按钮，弹出瞬态动力学分析设置面板，如图 17-15 所示，选择求解方法为完全法（Full），其他保持默认，单击“OK”按钮。

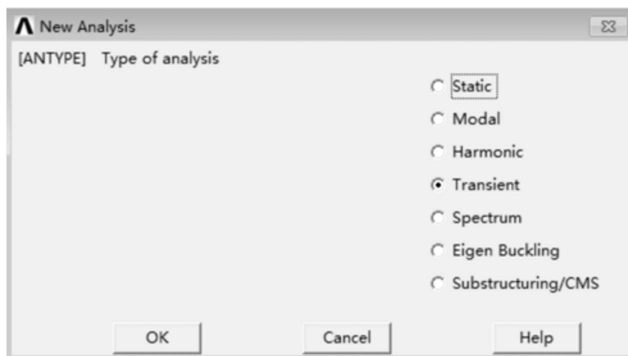


图 17-14 分析类型设置面板

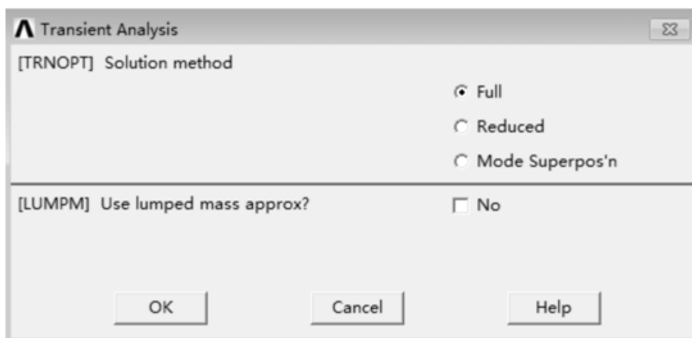


图 17-15 瞬态动力学分析设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出瞬态分析选项设置面板，如图 17-16 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保持默认设置，单击“OK”按钮。

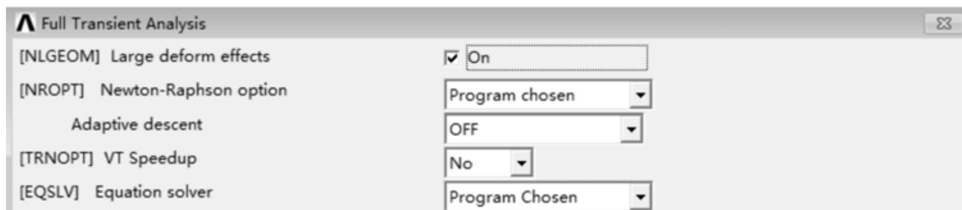


图 17-16 瞬态分析选项设置面板

2．定义边界条件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取控制节点 6114，单击“OK”按钮，弹出约束节点自由度设置面

板，如图 5-17 所示，选择约束类型（DOFs to be contrained）为 All DOF，单击“OK”按钮。

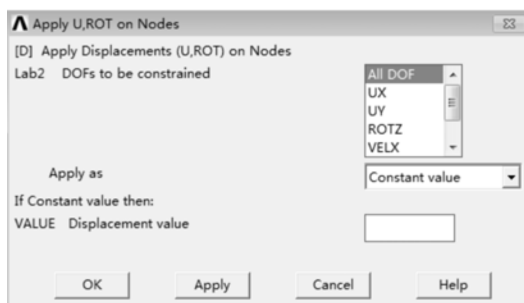


图 17-17 约束节点自由度设置面板

3. 定义初始速度

（1）选择实体单元 SOLID186

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 17-18 所示，按照图 17-18 进行设置，单击“OK”按钮。

（2）选择依附于实体单元 SOLID186 的所有节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 17-19 所示，按照图 17-19 进行设置，单击“OK”按钮。

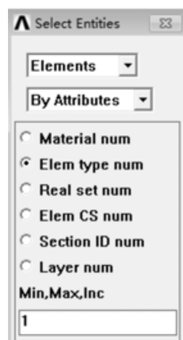


图 17-18 选择实体设置面板



图 17-19 选择实体设置面板

（3）施加轴向速度

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Initial Condition→Define，弹出拾取对话框，单击 Pick All，弹出定义初始条件面板，如图 17-20 所示，按照图 17-20 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

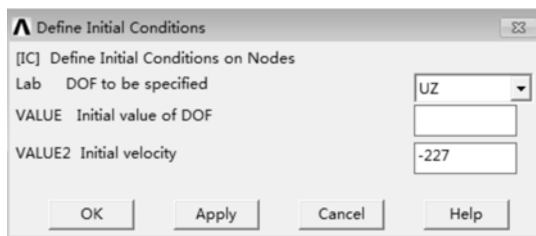


图 17-20 定义初始条件面板

（4）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

4．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）设置计算时间和子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 17-21 所示，计算时间（TIME）输入 80E-6，子步数量（Number of substeps）输入 100，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），自动时间步为程序选择（Prog Chosen），最大子步数为 10000，最小子步数为 100，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

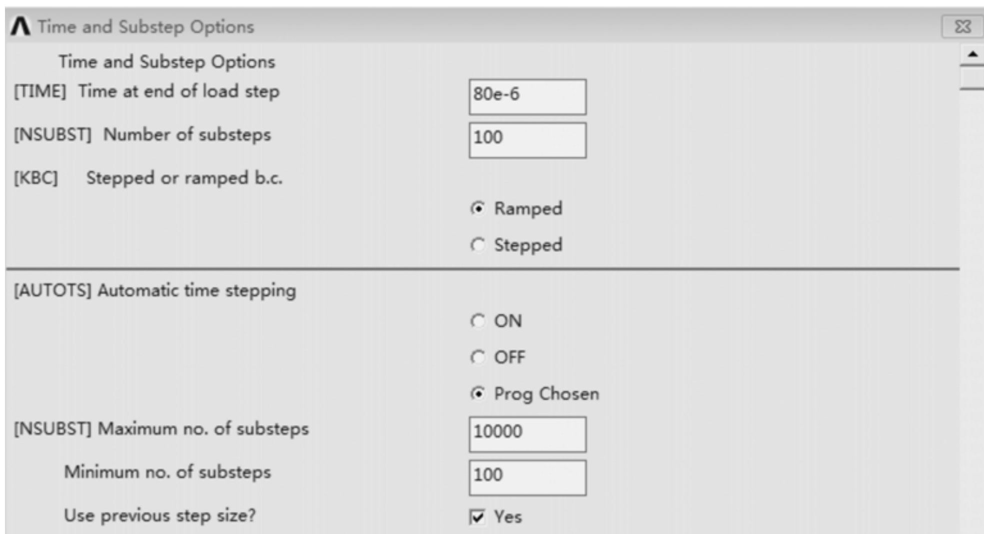


图 17-21 时间和子步选项设置面板

（3）设置瞬态求解算法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Transient，弹出时间积分定义面板，如图 17-22 所示，设置求解算法（Algorithm）为 HHT，幅值阻尼值（Amplitude decay）为 0.1，单击“OK”按钮。

（4）激活优化非线性算法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Solution Ctrl，弹出非线性求解控制面板，如图 17-23 所示，激活求解控制（Solution Control），单击“OK”按钮，激活弹出对话框的基于接触状态的时间预测选项（Time prediction based on contact status），单击“OK”按钮。

5．求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。



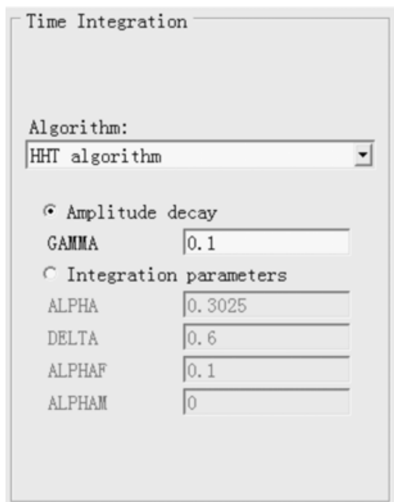


图 17-22　时间积分定义面板

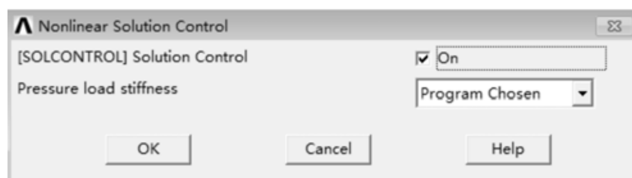


图 17-23　非线性求解控制面板

17.6.3 后处理

图 17-24～图 17-29 分别给出了求解过程中不同时刻的金属杆的等效应力云图，由图 17-24～图 17-29 可知，在金属杆撞击刚性墙的过程中，最大的等效应力先增大后减小。

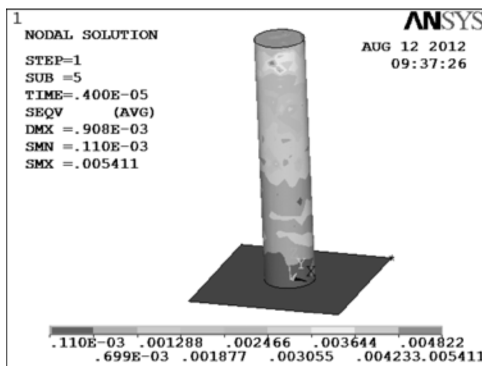


图 17-24　子步为 5 时的等效应力云图

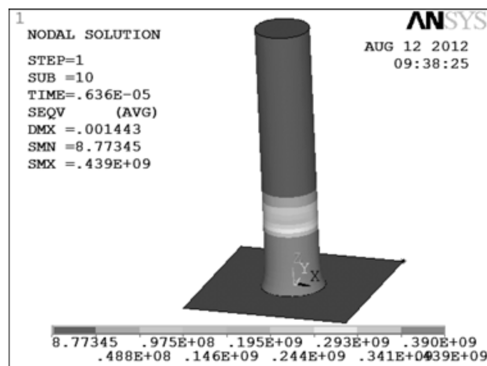


图 17-25　子步为 10 时的等效应力云图

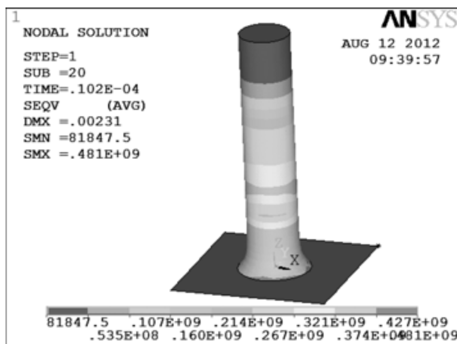


图 17-26　子步为 20 时的等效应力云图

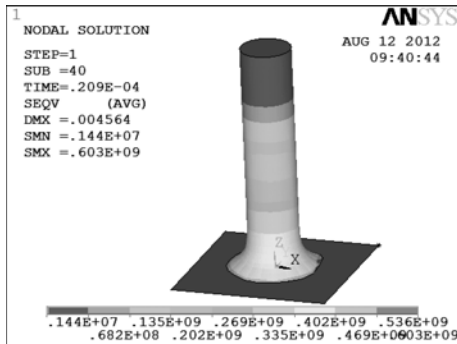


图 17-27　子步为 40 时的等效应力云图

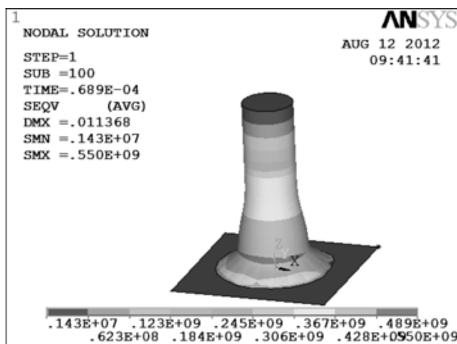


图 17-28　子步为 100 时的等效应力云图

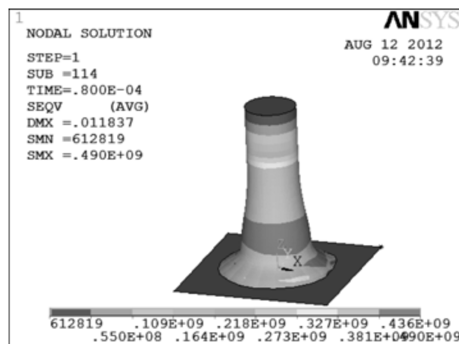


图 17-29　子步为 114 时的等效应力云图

图 17-30 给出了金属杆底面中心处 175 节点处的等效应力与时间的关系，由图 17-30 可知 175 节点处的等效应力最开始时由于金属杆与刚性强还没有发生接触，因此为 0。当发生撞击时，等效应力迅速增大，然后又迅速减小，最后稳步增大至最大值约为 720MPa，在撞击后期等效应力逐步下降。图 17-31 给出了金属杆底面侧边处的 2007 节点处等效应力与时间的关系，由图 17-31 可知，在金属杆撞击刚性墙的过程中等效应力先增大后稳步减小。图 17-32 和图 17-33 分别给出了 175 节点处的接触压力、穿透距离与时间的关系，由图 17-32、图 17-33 可知当接触压力出现峰值的时刻，穿透距离同时也出现峰值。

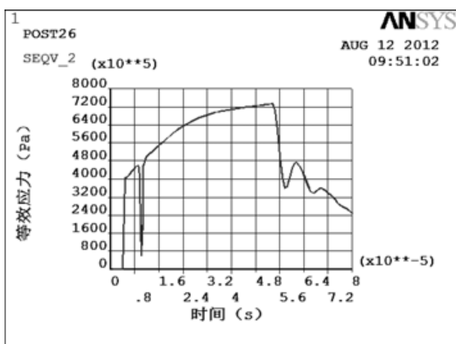


图 17-30　175 节点的等效应力与时间的关系

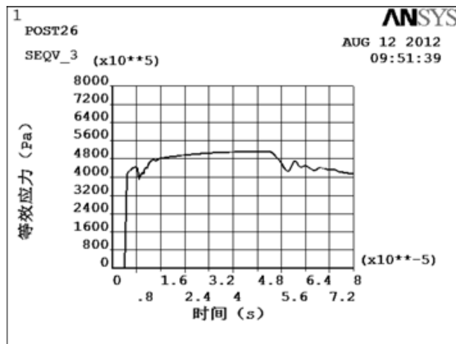


图 17-31　2007 节点的等效应力与时间的关系

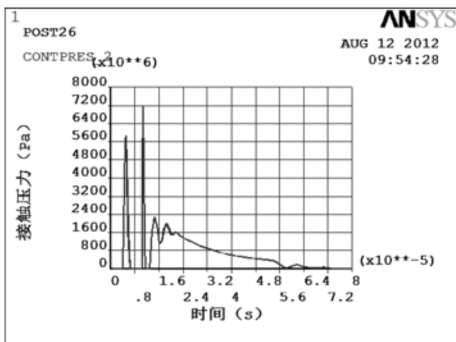


图 17-32　175 节点处的接触压力与时间关系

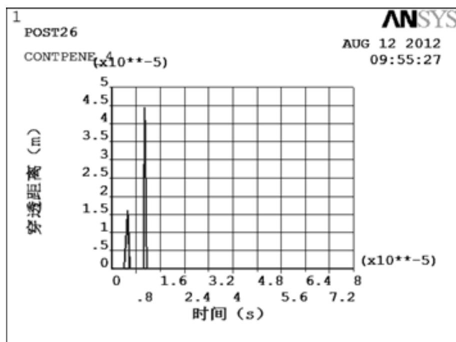


图 17-33　175 节点处的穿透距离与时间关系

图 17-34 和图 17-35 分别给出了 1638 单元和 1616 单元处的接触面积与时间的关系，由图 17-34、图 17-35 可知接触面积呈振荡性变化，并且在撞击后期，接触面积呈稳定值。

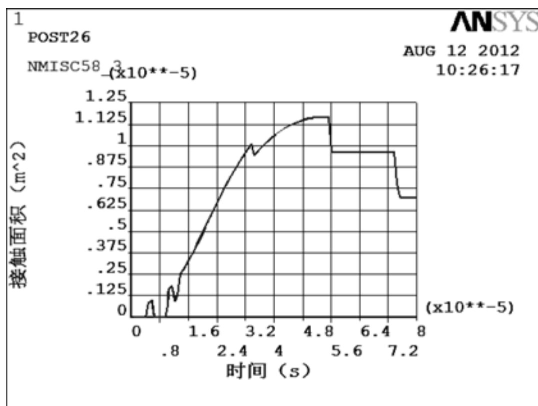


图 17-34　1638 单元接触面与时间的关系

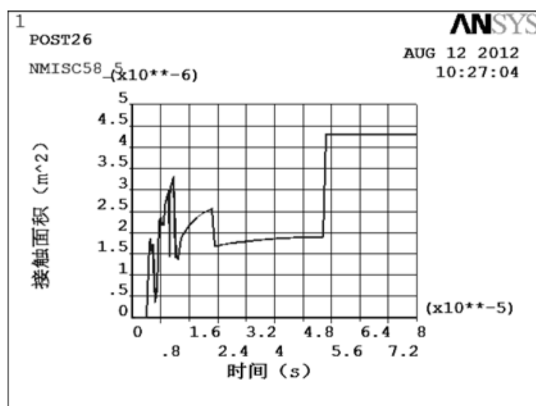


图 17-35　1616 单元接触面与时间的关系

17.7　命令流

```
/FILNAME,Metal rods impact the rigid wall,0
/PREP7
!定义几何参数
H= 32.4E-3                              !金属杆的长度  LENGTH OF THE BAR (m)
D=0.0064                                !金属杆的直径  (m)
DERTA=0.001
L=0.02
!定义单元
ET,1,SOLID186                           !为金属杆定义实体单元
!定义金属杆的材料模型
MP,EX,1,117E9                           !定义金属杆的弹性模量
MP,NUXY,1,0.35                          !定义金属杆的泊松比
MP,DENS,1,8930                          !定义金属杆的密度
TB,BISO,1                               !激活双线性等向强化模型
TBDATA,1,400E6                          !屈服应力
TBDATA,2,100E6                          !切线模量

CYLIND,D/2,0,DERTA,DERTA+H,0,360,
RECTNG,-L/2,L/2,-L/2,L/2,
ESIZE,D/6
VSWEEP,1
!定义接触
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,CWZ,GSAV,,TEMP
```

```
MP,MU,1,0
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221E-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
RMORE,10.0
KEYOPT,3,4,2
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,4
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,1
KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,5,0
!GENERATE THE TARGET SURFACE
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
!CREATE A PILOT NODE
KSEL,S,,,11
KATT,-1,3,2,-1
KMESH,11
!GENERATE THE CONTACT SURFACE
ASEL,S,,,1
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !CZMESH PATCH (FSK QT-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
```



```
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,CWZ,GSAV
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!进入求解器
/SOLU
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
NLGEOM,ON                        !激活大变形
D,6114, , , , , ,ALL, , , , ,
ESEL,S,TYPE,,1
NSLE
IC,ALL,UZ,,-227                  !施加初始速度
NSEL,ALL
ESEL,ALL
SOLCONTROL,ON,ON                 !激活非线性优化控制算法
TRNOPT,FULL, , , , ,HHT
TINTP,0.1
TIME,80E-6
NSUB,100,10000,100
OUTRES,ALL,ALL
SOLVE
FINISH
```

第 18 章　汽车充气轮胎与地面接触的有限元分析

18.1　引言

ANSYS 提供的流体静压单元非常适合计算包括流固耦合问题的流体体积和压力问题。当固体模型中包括了流体模型并且承受变化的载荷时，用户可以使用流体静压单元研究计算流体行为的变化。这种计算功能在本章实例中非常有用，它可以研究轮胎在充气和滚动过程中，轮胎内空气压力、密度和体积的变化。为了研究轮胎滚动阻力，必须准确地计算滚动过程中的轮胎内空气状态变化。

18.2　几何模型

如图 18-1 给出了轮胎和道路的三维模型，其中轮胎的厚度为 5mm，横截面为 270° 的扇形，内半径为 85mm，整个轮胎的内半径为 335mm。

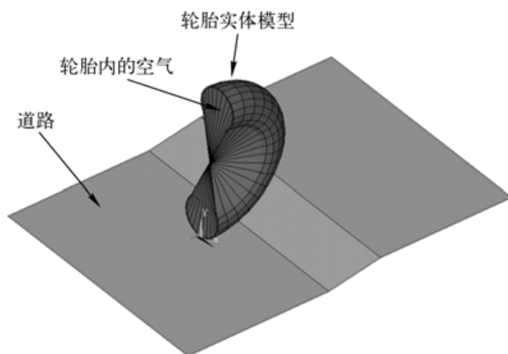


图 18-1　轮胎和道路的三维模型

18.3　材料的本构模型

本章实例采用的单位制为：ton，s 和 mm，相应的密度单位为 ton/mm^3，应力单位为 MPa，加速度为 9810mm/s^2。

18.3.1　轮胎的本构模型

轮胎的弹性模量为 6894.8MPa、泊松比为 0.5、密度为 2.768E-9ton/mm^3。假设轮胎的应

力-应变符合双参数 Mooney-Rivlin 模型，其应变能势函数：

$$W = C_{10}\left(\bar{I}_1 - 3\right) + C_{01}\left(\bar{I}_2 - 3\right) + \frac{1}{d}\left(J - 1\right)^2 \tag{18-1}$$

式中，W 为应变能势函数；$\bar{I}_1$ 为第一应变偏量不变量；$\bar{I}_2$ 为第二应变偏量不变量；C_{10} 和 C_{01} 为材料常数；d 为材料不可压缩参数。

材料的初始切变模量：

$$\mu = 2(C_{10} + C_{01}) \tag{18-2}$$

材料的初始体积模量：

$$K = \frac{2}{d} \tag{18-3}$$

式中，$d = (1-2\nu)/(C_{10} + C_{01})$。

计算中，$C_{10} = 0.551584$ MPa，$C_{01} = 0.137896$ MPa，d =0。

18.3.2 轮胎内空气的本构模型

假设轮胎内的空气为可压缩气体，计算参数如下：空气的初始密度为 1.225E-12 ton/mm^3，参考温度为 20℃，摄氏温度与热力学温度的偏移值为 274。

18.3.3 轮胎内强化纤维的本构关系

假设轮胎内的强化纤维为钢材料，弹性模量为 200GPa，泊松比为 0.3。

18.4 单元的选择

本章实例选用 PLANE183 单元和 SOLID186 单元联合模拟轮胎，使用 HSFLD242 单元模拟轮胎内的空气，使用 REINF265 单元模拟轮胎内强化纤维，使用 TARGE170、CONTA174 和 CONTA175 分别组成两个接触对模拟轮胎钢圈与轮胎接触、轮胎底面与路面接触，使用 MASS21 模拟轮胎承受的汽车重量。

18.5 边界条件和载荷

该实例共有五个载荷步，第一个载荷步为施加重力和参考温度，第二个载荷步为给轮胎充气施加轮胎内压，第三个载荷步为轮胎在重力作用下施加竖直向下位移 50mm，第四个载荷步为删除所有载荷及边界条件，第五个载荷步为 z 轴负方向的加速度 1400mm/s^2。

18.6 GUI 操作

18.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入

tire contact analysis，单击“OK”按钮。

2．选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 4 node 182 单元，单击“Apply”按钮；在对话框的左边继续选择 Solid，然后在右边选择 Brick 8 node 185 单元，单击“Apply”按钮；在对话框的左边继续选择 ANSYS Fluid，然后在右边选择 3D hydrostatic 242，单击“Apply”按钮；在对话框的左边继续选择 Contact，然后在右边选择 pt-to-surf175，单击“Apply”按钮；在对话框的左边继续选择 Contact，然后在右边选择 3D Target 170，单击“Apply”按钮；在对话框的左边继续选择 Contact，然后在右边选择 8 node 174，单击“Apply”按钮；在对话框的左边继续选择 Contact，然后在右边选择 3D Target 170，单击“Apply”按钮；在对话框的左边继续选择 Structural Mass，然后在右边选择 3D mass 21，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 HSFLD242。然后单击“Options”按钮选项，在弹出的对话框中设置流体质量（Fluid mass）为基于体积计算（Volume based），单击“OK”按钮，返回单元类型界面；在单元类型对话框中选择 CONTA175，然后单击“Options”按钮选项，在弹出的对话框中设置接触算法（Contact algorithm）为 MPC 算法（MPC algorithm），设置接触表面行为（Behavior of contact surface）为总是粘结接触（Bonded（always））单击“OK”按钮，返回单元类型界面；在单元类型对话框中选择 Type 5 TARGE170。然后单击“Options”按钮选项，在弹出的对话框中设置刚性目标节点的边界条件设置方法（B.C for rigid target nodes）为用户自定义（User definition），单击“OK”按钮，返回单元类型界面；在单元类型对话框中选择 MASS21，然后单击“Options”按钮选项，在弹出的对话框中设置转动惯量选项（Rotary inertia options）为不考虑转动关联的三维质量（3-D w/o rot iner），单击“OK”按钮，返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。设置接触单元 CONTA174 考虑冲击约束，但该关键字设置暂不支持 GUI 操作，因此需在命令流窗口输入：

```
keyopt,6,7,4
```

3．实常数

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，弹出实常数定义面板，单击“Add”按钮，选择单元 HSFLD242，单击“OK”按钮，弹出 HSFLD242 实常数定义面板，如图 18-2 所示，输入参考压力值为 0.12，单击“OK”按钮；单击“Add”按钮，选择单元类型 4 CONTA175，单击“OK”按钮，保持默认设置，单击“OK”按钮；单击“Add”按钮，选择单元类型 CONTA174，单击“OK”按钮，保持默认设置，单击“OK”按钮；单击“Add”按钮，选择单元类型 MASS21，单击“OK”按钮，弹出 MASS21 实常数定义面板，如图 18-3 所示，输入轮胎承受的质量为 1000，单击“OK”按钮，单击“Close”按钮。

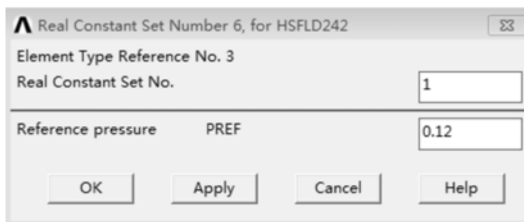


图 18-2　HSFLD242 实常数定义面板

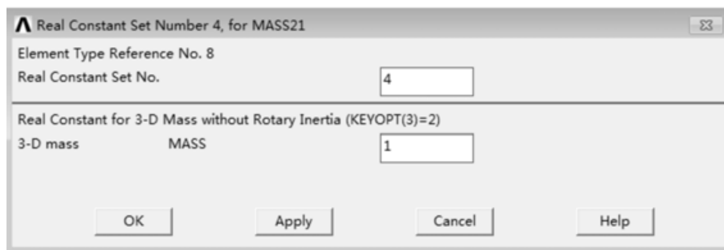


图 18-3　MASS21 实常数定义面板

4．定义材料模型

（1）定义轮胎的材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 18-4 所示，输入 EX=6894.8、PRXY=0.5，单击“OK”按钮，继续单击 Structural→Nonlinear→Elastic→Hyperelastic→Mooney-Rivlin→2 parameters，弹出 Mooney-Rivlin 双参数材料模型定义面板，如图 18-5 所示，输入 C10=0.55158、C01=0.1379、d=0，单击“OK”按钮，继续单击 Structural→Density，弹出材料密度定义面板，输入轮胎密度为 2.768E-6，单击“OK”按钮。

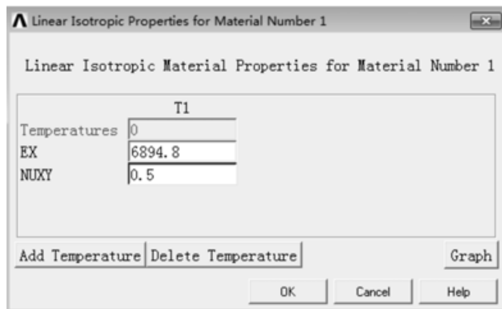


图 18-4　各向同性线弹性材料定义面板

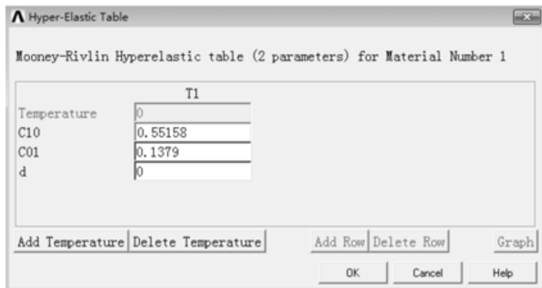


图 18-5　Mooney-Rivlin 双参数材料模型定义面板

（2）定义轮胎的材料模型内空气材料模型

对于空气材料模型 ANSYS14 暂不支持该材料模型的 GUI 操作，需在命令窗口输入以下命令流：

```
tb,fluid,2,1,1,gas          !激活流体材料为空气
tbdata,1,1.225e-9           !设置空气密度
```

```
mp,reft,2,20        !设置空气参考温度
toffst,274          !设置热力学温度与摄氏温度的差值
```

（3）定义轮胎底面与路面的摩擦模型

ANSYS 提供了库仑摩擦模型，当该摩擦模型定义为材料模型时，ANSYS 暂不支持 GUI 操作，需在命令窗口输入以下命令流：

```
tb,fric,3,,,iso     !激活各向同性库仑摩擦模型
TBDATA,1,0.2        !定义摩擦系数为 0.2
```

（4）定义轮胎内钢丝强化纤维材料模型

单击 Material→New Model，在弹出的对话框框中输入 4，单击“OK”按钮。单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 18-4 所示，输入 EX=2E5、PRXY=0.3，单击“OK”按钮。

5．定义轮胎内强化纤维的截面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Sections→Reinforcing→Add / Edit，弹出强化纤维截面设置面板，按照图 18-6 所示进行设置，设置完毕后单击“OK”按钮。然后继续输入 ID 号为 2，将 V1 修改为 2，其他保存不变，单击“OK”按钮。

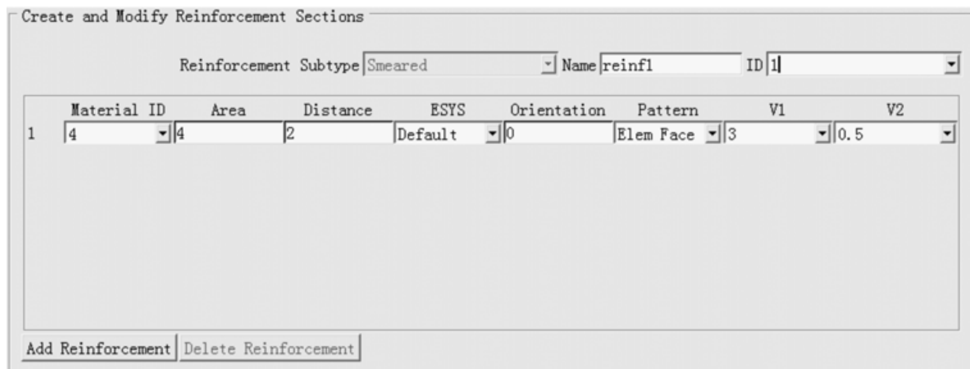


图 18-6　强化纤维截面设置面板

6．建立轮胎实体模型

本实例的模型联合应用实体模型和有限元模型建模技术，因此在该步骤既有实体模型也包括有限元模型。

（1）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，弹出在激活坐标系中定义关键点面板，如图 18-7 所示，在面板中关键点号（Keypoint number）中输入 1，在激活的坐标系中输入 X=0，Y=90，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 2，X=0，Y=90，Z=1，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 3，X=−63.6396103068，Y=153.6396103068，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 4，X=−60.1040764009，Y=150.1040764009，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 5，X=0，Y=340，Z=0，单击“Apply”按钮；继续输入关键点号为 6，X=1，Y=340，Z=0，单击“OK”按钮。

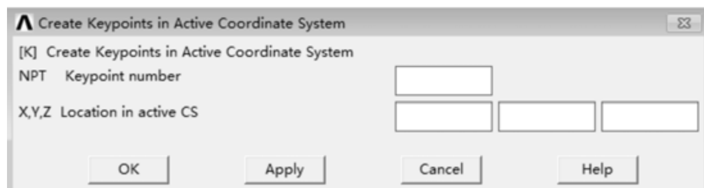


图 18-7 定义关键点面板

（2）定义关键点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord，弹出拾取对话框，拾取关键点 3 和 4，单击“OK”按钮。

（3）将线旋转成面

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→About Axis，弹出拾取对话框，拾取线 L1，单击“Apply”按钮，继续拾取关键点 1 和 2，单击“OK”按钮，弹出线绕轴扫描定义面板，如图 18-8 所示，输入线转动角度为 270°，划分的面片段为 15，单击“OK”按钮。

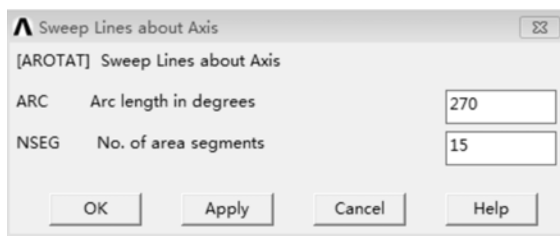


图 18-8 线绕轴扫描定义面板

（4）划分轮胎横截面网格

1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocesso→Meshing→MeshTool

2）设置总体网格尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 18-9 所示。

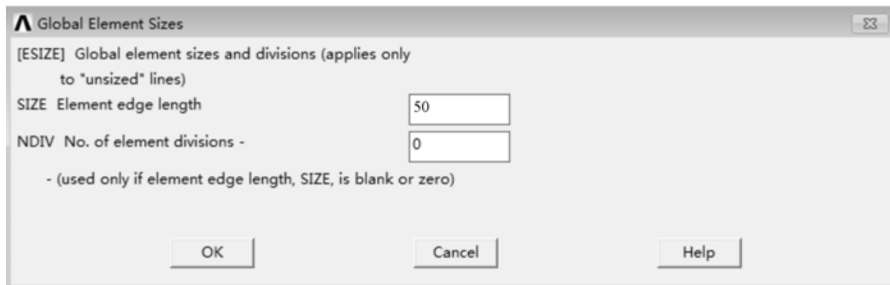


图 18-9 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 50，单击“OK”按钮。

3）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

（5）设置单元拉伸选项面板

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Elem Ext Opts，弹出单元拉伸选项面板，如图 18-10 所示，设置单元类型为 SOLID185，每个片段拉伸单元数量为 8，并选择生成体单元后删除面单元。设置完毕，单击“OK”按钮。

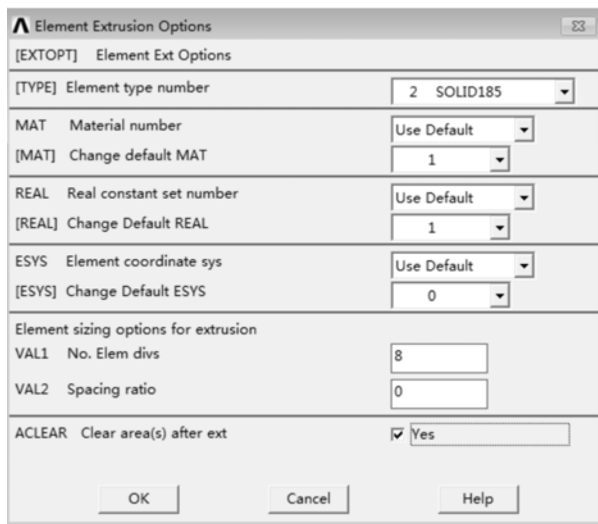


图 18-10　单元拉伸选项面板

（6）将面单元拉伸成体单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→About Axis，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出拾取对话框，拾取关键点 5 和 6，单击“OK”按钮。

7．建立轮胎内空气模型

（1）定义节点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，弹出在当前坐标系中创建节点面板，如图 18-11 所示，输入节点号为 10000，对应的节点坐标为 0，340，0，单击“OK”按钮。

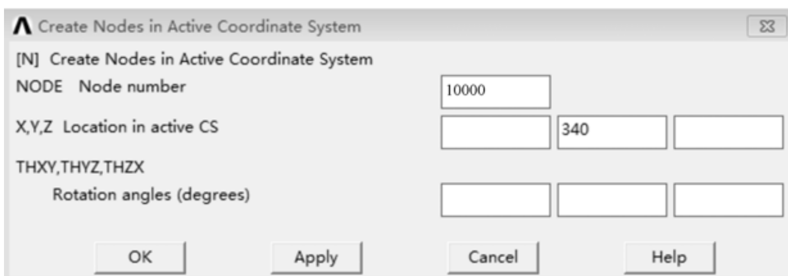


图 18-11　在当前坐标系中创建节点面板

（2）设置单元属性

GUI：单击 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 18-12 所示，设置单元类型为 HSFLD242，材料号为 2，实常数号为 1，单击“OK”按钮。

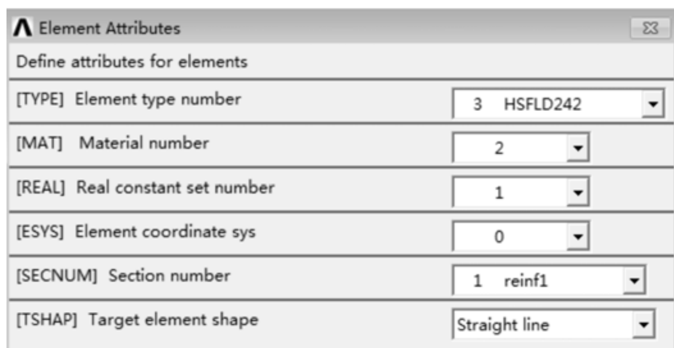


图 18-12 单元属性设置面板

（3）选择轮胎内表面

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 18-13 所示，按照图 18-13 进行设置，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，如图 18-14 所示，按图 18-14 进行设置，单击“OK”按钮。



图 18-13 选择实体设置面板



图 18-14 拾取对话框

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 18-13 所示，选择 Also Select，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，如图 18-14 所示，选择输入 78，120，3，单击“OK”按钮。

（4）选择依附于面的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 18-15 所示，按照图 18-15 进行设置，单击“OK”按钮。

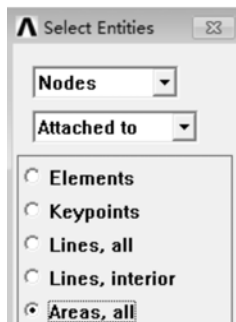


图 18-15 选择实体设置面板

（5）自动创建流体静压单元

对于流体静压单元自动创建单元方法，暂不支持 GUI 操作，需输入以下命令流：

```
esurf,10000
```

其中，10000 为流体静压单元的顶节点。

（6）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

8．定义带控制节点的接触对

该接触对主要模拟轮胎钢圈与轮胎的刚-柔接触，并通过控制节点来控制的轮胎运动。

（1）定义控制节点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，弹出在当前坐标系中创建节点面板，输入节点号为 5000，对应的节点坐标为 0，340，0，单击“OK”按钮。

（2）设置目标单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 18-16 所示，设置单元类型为 5 号单元 TARGE170，实常数号为 2，目标单元形状为控制节点（Pilot node），单击“OK”按钮。

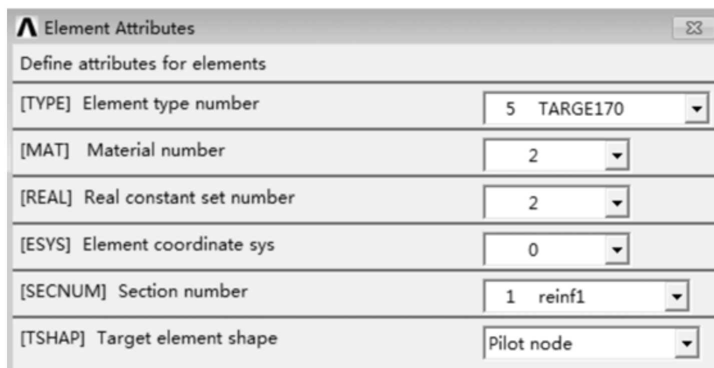


图 18-16 单元属性设置面板

（3）创建目标单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，弹出拾取对话框，输入 1026，单击“OK”按钮。

（4）设置接触单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 18-16 所示，设置单元类型为 4 号单元 CONTA174，实常数号为 2，其他保持不变，单击“OK”按钮。

（5）选择轮胎内圈外侧的线

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择线设置面板，如图 18-17 所示，按照图 18-17 进行设置，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，拾取线 124，156，51 和 125，单击“OK”按钮。

（6）选择依附于选择线的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择节点设置面板，如图 18-18 所示，按照图 18-18 进行设置，单击“OK”按钮。

（7）创建接触单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Node to Surf，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。



图 18-17 选择线设置面板

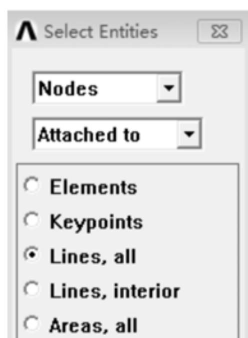


图 18-18 选择节点设置面板

（8）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

9．定义轮胎底面与路面的刚-柔接触

（1）定义节点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，弹出在当前坐标系中创建节点面板，输入节点号为 5001，对应的节点坐标为 500，-20，500，单击“Apply”按钮；继续输入节点号为为 5002，对应的节点坐标为 500，-20，-200，单击“Apply”按钮；继续输入节点号为为 5003，对应的节点坐标为 500，30，-450，单击“Apply”按钮；继续输入节点号为 5004，对应的节点坐标为 500，30，-1100，单击“Apply”按钮；继续输入节点号为 5005，对应的节点坐标为-500，-20，500，单击“Apply”按钮；继续输入节点号为 5006，对应的节点坐标为-500，-20，-200，单击“Apply”按钮；继续输入节点号为 5007，对应的节点坐标为-500，30，-450，单击“Apply”按钮；继续输入节点号为 5008，对应的节点坐标为-500，30，-1100，单击“OK”按钮。

（2）设置目标单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 18-16 所示，设置单元类型为 7 号单元 TARGE170，实常数号为 3，材料号为 3，目标单元形状为 4 node quad，单击“OK”按钮。

（3）创建目标单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，弹出拾取对话框，拾取节点 5001、5002、5006、5005，单击“Apply”按钮；继续拾取节点 5002、5003、5007、5006，单击“Apply”按钮；继续拾取节点 5003、5004、5008、5007，单击“OK”按钮。

（4）设置接触单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 18-16 所示，设置单元类型为 6 号单元 CONTA174，实常数号为

3，材料号为 3，单击“OK”按钮。

（5）选择轮胎底面

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择面设置面板，如图 18-13 所示，按照图 18-13 进行设置，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，如图 18-14 所示，将输入的面号修改为 92，110，3，单击“OK”按钮。GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 18-13 所示，单击“Also Select”按钮，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，如图 18-14 所示，输入 35，59，4，单击“OK”按钮。

（6）选择依附于轮胎底面的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 18-15 所示，按照图 18-15 进行设置，单击“OK”按钮。

（7）创建接触单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf/Contact→Surf to Surf ，弹出划分自由面设置面板，保存默认设置，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

（8）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

10．定义质量单元

（1）设置单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 18-16 所示，设置单元类型为 8 号单元 MASS21，实常数号为 4，单击“OK”按钮。

（2）创建质量单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，弹出拾取对话框，输入 1026，单击“OK”按钮。

11．定义强化纤维

对于强化纤维单元的创建，主要步骤如下：选择相应的基体（实体或壳体单元），然后使用 EREINF 进行创建，输入的命令流如下：

```
vsel,s,volu,,1,15      !选择体从 1 号到 15 号
eslv,s                 !从选择的体中选择单元
esel,r,type,,2         !从选择的体中选择单元中进一步筛选为单元号为 2 的单元，即 SOLD185
 secnum,2              !设置强化纤维的截面号为 2
ereinf                 !创建强化纤维
allsel,all

vsel,s,volu,,16,60
eslv,s
esel,r,type,,2
secnum,1
ereinf
allsel,all
```

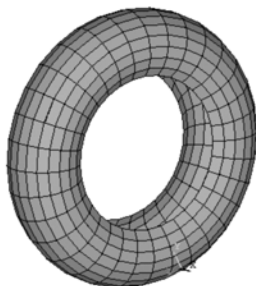


图 18-19　强化纤维单元

图 18-19 给出了创建完毕的强化纤维单元。

18.6.2 求解

1. 设置分析类型

（1）激活瞬态动力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面板，如图 18-20 所示，选择瞬态动力学分析（Transient），单击“OK”按钮，弹出瞬态动力学分析设置面板，如图 18-21 所示，选择求解方法为完全法（Full），其他保持默认。单击“OK”按钮。

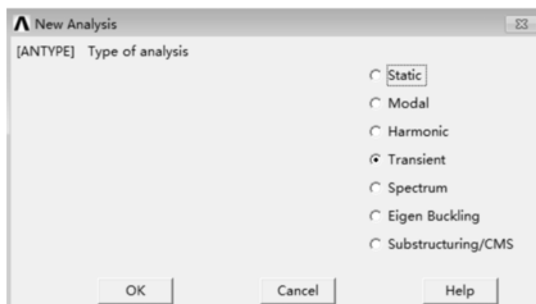


图 18-20 分析类型设置面板

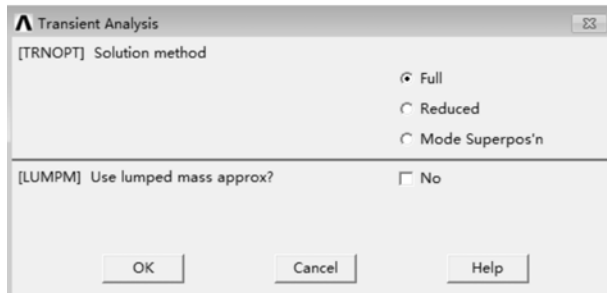


图 18-21 瞬态动力学分析设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出瞬态分析选项设置面板，如图 18-22 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

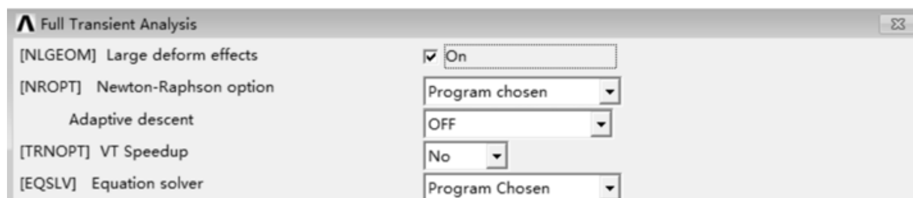


图 18-22 瞬态分析选项设置面板

2．定义边界条件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取节点 1026，单击“OK”按钮，弹出在节点上施加约束设置面板，选择约束类型为 ALL，单击“OK”按钮。

3．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）设置瞬态求解算法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Transient，弹出如图 18-23 所示的时间积分定义面板，设置求解算法（Algorithm）为 HHT，幅值阻尼值（Amplitude decay）为 0.1，单击“OK”按钮。

（3）激活优化非线性算法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Solution Ctrl，弹出非线性求解控制面板，如图 18-24 所示，激活求解控制（Solution Control），单击“OK”按钮，激活弹出对话框的基于接触状态的时间预测选项（Time prediction based on contact status），单击“OK”按钮。

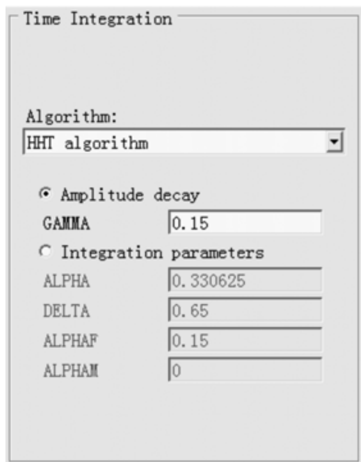


图 18-23　时间积分定义面板

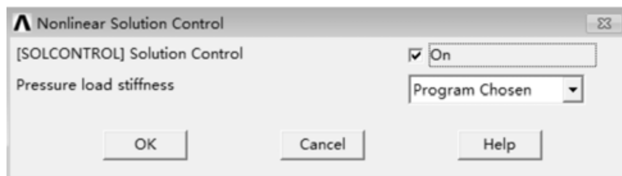


图 18-24　非线性求解控制面板

（4）激活共享内存平行计算

该功能暂不支持 GUI 激活，只需输入以下命令流：

```
pscontrol,all,on
```

4．求解第一个载荷

（1）关闭瞬态效应

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time Integration→Amplitude Decay，弹出时间积分控制面板，将瞬态效应关闭（Transient Effects On or Off）（Off）。

（2）施加重力载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Inertia→Gravity→Global，弹出施加重力加速度面板，如图 18-25 所示，输入 Y 方向的重力加速度为 9810，单击“OK”按钮。

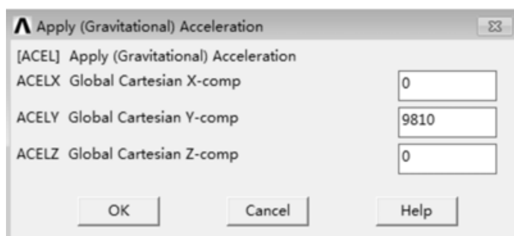


图 18-25 施加重力加速度面板

（3）施加轮胎内空气温度

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Nodes，弹出拾取对话框，输入节点号为 10000，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加温度面板，输入温度为 20。

（4）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 18-26 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps） 输入 1，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），最大子步数为 100，最小子步数为 1，其他保持默认。单击“OK”按钮。



图 18-26 时间和子步选项设置面板

（5）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

5．求解第二个载荷

（1）将轮胎气压提高到 0.2482128MPa

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On

Nodes，弹出拾取对话框，输入 10000，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加约束设置面板，如图 18-27 所示，设置约束类型为 HDSP，对应的数值为 0.2482128，单击“OK”按钮。

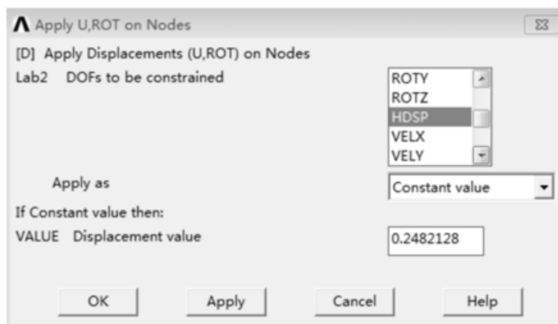


图 18-27 在节点处施加约束设置面板

（2）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出如图 18-26 所示的时间和子步选项设置面板，计算时间（TIME）输入 2，子步数量（Number of substeps） 输入 10，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），最大子步数为 100，最小子步数为 1，其他保存默认。单击“OK”按钮。

（3）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

6．求解第三个载荷

（1）将轮胎向下移动 50mm

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，输入 5000，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加约束设置面板，如图 18-27 所示，设置约束类型为 UY，对应的数值为-50，单击“OK”按钮。

（2）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 18-26 所示，计算时间（TIME）输入 3，子步数量（Number of substeps） 输入 100，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），最大子步数为 1000，最小子步数为 10，其他保持默认。单击“OK”按钮。

（3）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

7．求解第四个载荷

（1）渐进式删除控制节点 5000 相关约束

渐进式删除约束的功能暂不支持 GUI 操作，需输入以下命令流。

```
ddele,5000,uy,,,force
ddele,5000,rotx,,,force
```

```
ddele,5000,roty,,,force
ddele,5000,rotz,,,force
ddele,10000,hdsp
```

（2）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，计算时间（TIME）输入4，子步数量（Number of substeps）输入 5，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），最大子步数为 100，最小子步数为 1，其他保持默认。单击“OK”按钮。

（3）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

8．求解第五个载荷

（1）设置求解控制面板-瞬态分析面板

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Transient，弹出求解控制中的瞬态分析部分面板，如图 18-28 所示，激活瞬态效应，载荷加载方式为阶跃加载，中间残差准则设置为 1E6，以便考虑较大的增量，单击“OK”按钮。

（2）设置轮胎的水平方向的加速度

该项功能 ANSYS 目前暂不支持 GUI 操作，需输入以下命令流：

```
d,5000,accz,-1400.0
```

（3）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 18-26 所示，计算时间（TIME）输入 5，子步数量（Number of substeps）输入 10，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），最大子步数为 1000，最小子步数为 10，其他保持默认。单击“OK”按钮。

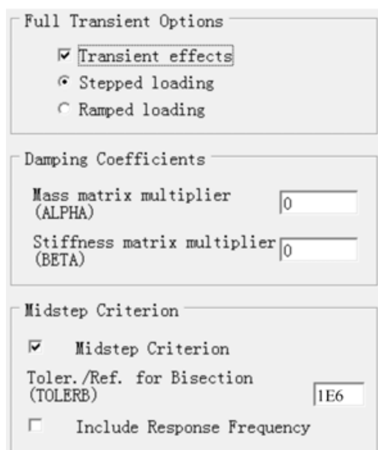


图 18-28　求解控制中的瞬态分析部分面板

（4）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

18.6.3 后处理

图 18-29～图 18-33 分别给出了轮胎中不同部分不同时刻的位移云图，由图 18-30 可知充气后轮胎的径向膨胀了大约 7mm，由图 18-31 可知轮胎本体中的最大等效应力发生在与轮毂接触的地方，因此强化纤维的最大等效应力发生处也是在与轮毂接触的地方。由图 18-33 可知，4s 时刻的轮胎最大接触压力为 0.283MPa。图 18-34 为轮胎底部的局部视图。



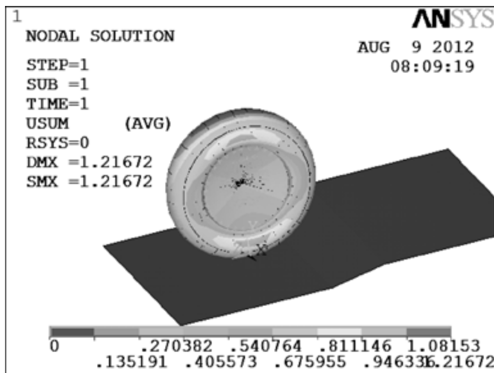


图 18-29　1s 时刻的位移云图

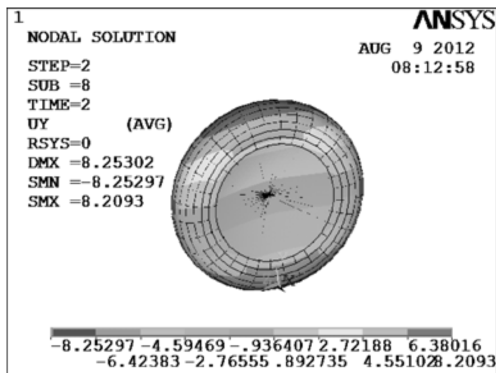


图 18-30　2s 时刻的轮胎内空气的 y 方向位移云图

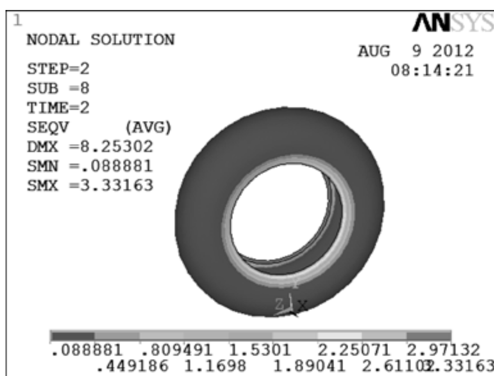


图 18-31　2s 时刻的轮胎等效应力

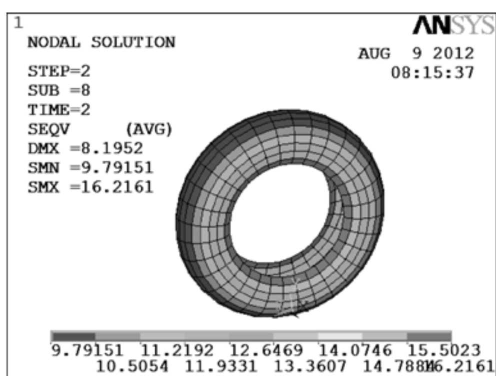


图 18-32　2s 时刻的轮胎内强化纤维的等效应力

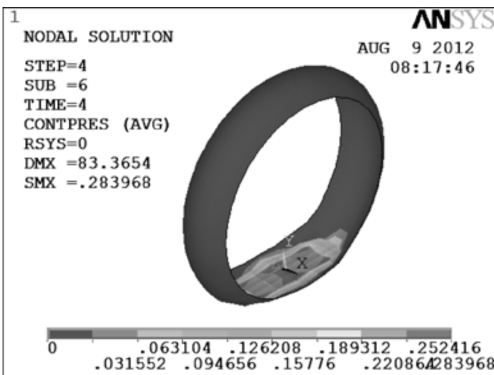


图 18-33　4s 时刻的轮胎底面的接触压力云图



图 18-34　轮胎底部的局部视图

图 18-35～图 18-40 分别给出了 16 号节点与 260 号节点处的接触压力，x 方向速度和 y 方向速度随时间变化的关系曲线。由图 18-35 和图 18-36 可知，16 号节点的最大接触压力约为 0.36MPa，260 号节点的最大接触压力约为 0.4MPa，并且当轮胎滚过之后，接触压力迅速下降到 0。由图 18-37 和图 18-38 可知，两个节点处的 x 方向速度在轮胎滚动阶段都是振动变化，由图 18-39 和图 18-40 可知，由于轮胎滚动过程中与路面接触的阶段 y 方向没有位移，因此图 18-39 和图 18-40 中的初始阶段的速度为 0，当离开与路面的接触区后振荡上升。

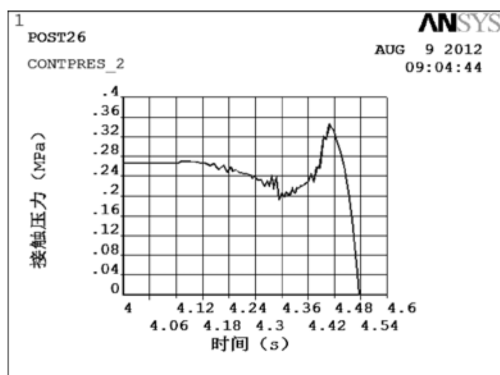


图 18-35　轮胎 16 号节点接触压力与时间的关系

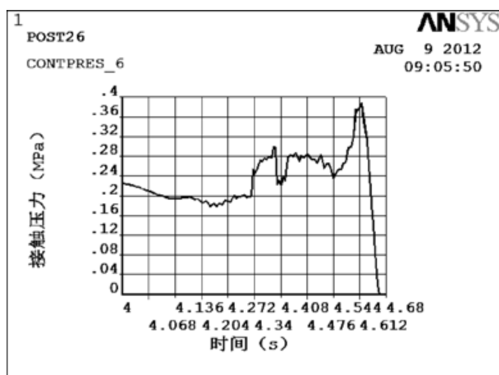


图 18-36　轮胎 260 号节点接触压力与时间的关系

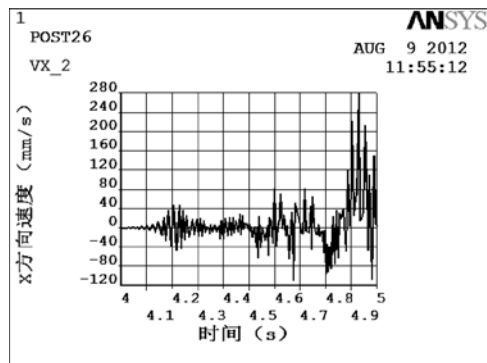


图 18-37　轮胎 16 号节点 *x* 方向速度与时间的关系

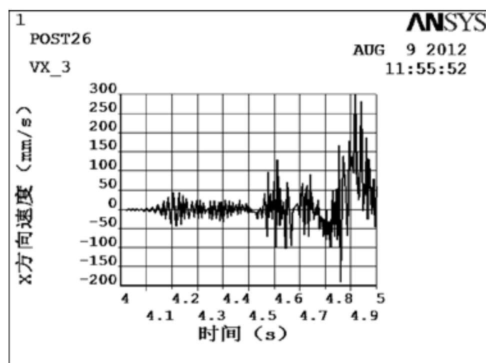


图 18-38　轮胎 260 号节点 *x* 方向速度与时间的关系

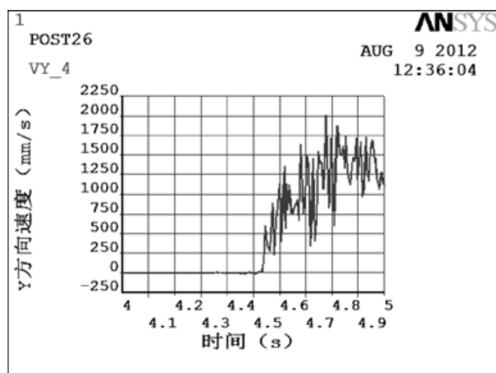


图 18-39　轮胎 16 号节点 *y* 方向速度与时间的关系

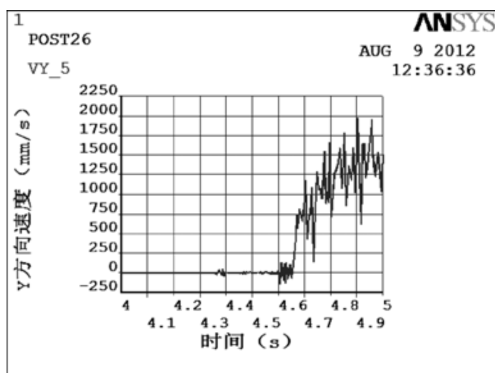


图 18-40　轮胎 260 号节点 *y* 方向速度与时间的关系

18.7　命令流

```
/FILNAME,Tire contact analysis,0
/prep7
et,1,PLANE182                !定义二维平面单元
et,2,SOLID185                !定义三维实体单元
```

```
et,3,HSFLD242                 !定义流体静压单元
et,4,CONTA175                 !为轮缘定义接触单元
et,5,TARGE170
et,6,CONTA174                 !为轮胎表面定义接触单元
et,7,TARGE170
et,8,MASS21                   !定义质量单元

keyopt,3,5,1                  !基于流体单元的体积引入流体质量
keyopt,4,2,2                  !使用 mpc 约束
keyopt,4,12,5                 !设置接触状态为总是接触
keyopt,5,2,1                  !激活用户自由度
keyopt,6,7,4                  !定义冲击接触约束
keyopt,8,3,2                  !设置质量单位为不考虑转动关联的三维质量

r,1,0.12 !
R,2,,,, ,,
RMORE,,,, ,,
RMORE,,,, ,,
RMORE,,,, ,,
RMORE,,,,,
RMORE,,,,

R,3,,,, ,,
RMORE,,,, ,,
RMORE,,,, ,,
RMORE,,,, ,,
RMORE,,,,,
RMORE,,,,

r,4,1,

!定义轮胎的材料参数

mp,ex,1,6894.8                !定义弹性模量
mp,nuxy,1,0.5
mp,dens,1,2.768e-9            !定义密度
tb,hyper,1,,,mooney
tbdata,1,0.551584,0.137896


!定义轮胎内空气的属性参数
tb,fluid,2,1,1,gas
tbdata,1,1.225e-12            !设置空气的初始密度
mp,reft,2,20
toffst,274
```



```
!定义摩擦模型
tb,fric,3,,,iso
tbdata,1,0.2

!定义轮胎内强化纤维的材料参数
mp,ex,4,2.0e5
mp,nuxy,4,0.3


sectype,1,reinf,smear,reinf1
secdata,4,4,2,,,ELEf,3,0.5

sectype,2,reinf,smear,reinf2
secdata,4,4,2,,,ELEf,2,0.5

/com ============================================================
/com   创建轮胎实体模型
/com ============================================================
k,1,0.,90.
k,2,0.,90.,1.
k,3,-63.6396103068,153.6396103068
k,4,-60.1040764009,150.1040764009
k,5,0.,340.,0.
k,6,1.,340.,0.

l,3,4

arotat,1, , , , , ,1,2,270,15

!为面划分网络
type,1
mat,1
esize,50
amesh,all

TYPE,    2
EXTOPT,ESIZE,16,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
MAT,1
REAL,1
VROTAT,ALL, , , , , ,5,6 ,360,2,

/com ============================================================
/com   创建轮胎内空气的流体静压单元
/com ============================================================
```

```
n,10000,0.,340.,0.
type,3
mat,2
real,1

Asel,s,AREA,,17,73,4
Asel,a,AREA,,78,120,3

NSLA,S,1
esurf,10000
allsel,all

/com ==========================================================
/com   定义接触
/com ==========================================================
n,5000,0,340,0

/com Modeling of rim

!定义控制节点
tshap,pilot
type,5
real,2
e,5000

!定义接触单元
type,4
real,2
lsel,s,line,,124
lsel,a,line,,156
lsel,a,line,,51
lsel,a,line,,125
nsll,s,1
esurf
allsel,all

!定义轮胎底部与路面的刚-柔接触

!定义路面模型节点
n,5001,500.,-20.,500.
n,5002,500.,-20.,-200.
n,5003,500.,30.,-450.
n,5004,500.,30.,-1100.
n,5005,-500.,-20.,500.
n,5006,-500.,-20.,-200.
n,5007,-500.,30.,-450.
```



```
n,5008,-500.,30.,-1100.

!定义目标面
type,7
real,3
mat,3
tshap,quad
e,5001,5002,5006,5005
e,5002,5003,5007,5006
e,5003,5004,5008,5007

!定义接触单元
type,6
real,3
mat,3
Asel,s,AREA,,92,110,3
Asel,a,AREA,,35,59,4

nsla,s,1
esurf
allsel,all

/定义质量单元
type,8
real,4

e,5000

/com ==========================================================
/com   创建轮胎内的强化纤维
/com ==========================================================

vsel,s,volu,,1,15
eslv,s
esel,r,type,,2
secnum,2
ereinf
allsel,all

vsel,s,volu,,16,60
eslv,s
esel,r,type,,2
secnum,1
ereinf
allsel,all
```

```
/solu
antype,trans
nlgeom,on

!定义边界条件
d,5000,all

OUTRES,ALL,ALL,
trnopt,full, , , , ,HHT
tintp,0.15
solcontrol,on,on
pscontrol,all,on

!载荷步 1—施加初始温度和重力载荷
timint,off
acel,0,9810,0.
bf,10000,temp,20
nsubst,1,100,1
time,1
solve

!载荷步 2
d,10000,hdsp,0.2482128
kbc,0
nsubst,10,100,1
time,2
solve

!载荷步 3
d,5000,uy,-50
nsubst,100,1000,10
time,3
solve

!载荷步 4

ddele,5000,uy,,,force
ddele,5000,rotx,,,force
ddele,5000,roty,,,force
ddele,5000,rotz,,,force
ddele,10000,hdsp
nsubst,5,100,1
time,4
```

```
solve

!载荷步 5
timint,on
kbc,1
midtol,on,1e6
d,5000,accz,-1400.0          !施加重力加速度边界条件
nsubst,10,1000,10
time,5
solve
```



第 19 章　搅拌摩擦焊接模拟

19.1　引言

搅拌摩擦焊接（Friction stir welding，FSW）是英国焊接研究所于 1991 年发明的一种新型焊接工艺。其最初的目的是用于低熔点合金板材焊接，如铝合金、镁合金等。搅拌摩擦焊接是一种机械力和摩擦热作用下的固相连接方法。在焊接过程中，一个柱形带特殊轴肩和搅拌针的搅拌头旋转着插入焊接工件，焊接工件两侧固定防止其移动。搅拌头一边高速旋转一边移动，搅拌头和被焊接材料之间的摩擦剪切阻力产生了摩擦热，使搅拌头附近区域的材料热塑化，在焊接过程中焊接工件的最高稳定温度不会超过材料的熔点。当搅拌头旋转着向前移动时，热塑化的金属材料从搅拌头的前方向后方转移，其周围的材料也不断地被加热、搅拌、混合，并且在搅拌头轴肩与工件表层摩擦产热和锻压共同作用下，形成致密的固相连接接头。

作为一种连接轻质合金材料的优选焊接技术，搅拌摩擦焊接已经从技术研究进入了高层次的工程化和工业化应用阶段，形成了 FSW 设备制造与 FSW 产品加工的新产业，在制造业领域得到了广泛应用。

本章实例主要介绍 ANSYS 如何实例模拟摩擦搅拌焊接的过程。摩擦搅拌焊接具有以下几个特征：两个工件表面之间的接触、摩擦生热和塑性变形。本章实例联合使用直接耦合法，接触分析，实现对搅拌摩擦焊接过程的模拟。

19.2　几何模型

如图 19-1 所示，搅拌摩擦焊接模拟的模型主要由两块 304L 不锈钢和一个圆柱形搅拌头组成。真实的搅拌头包括搅拌针和轴肩两部分。因为搅拌针在整个焊接过程产生的热量只占 2%，因此模型中可以忽略，即该模型的圆柱形搅拌头为轴肩。具体几何尺寸如下：每一块焊接工件长度为 76.2mm，宽度为 31.75mm，厚度为 3.18mm，轴肩的半径为 2.62mm，轴肩的高度为 15.24mm。

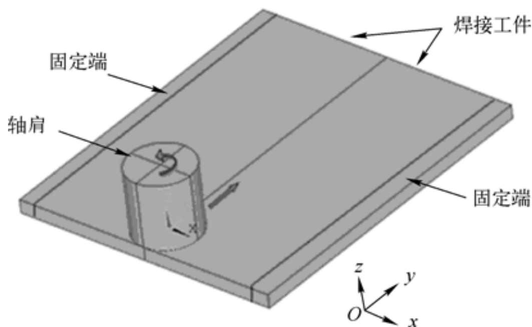


图 19-1　焊接工件和搅拌头模型图

19.3 材料的本构模型



因为应力和应变在焊接过程与温度相关，因此准确的温度对于模拟 FSW 过程至关重要。焊接工件的弹性模量为 193GPa、泊松比为 0.3、热膨胀系数为 1.875E-5，采用双线等向强化模型模拟焊接工件的弹塑性应力-应变关系，其中屈服强度为 290MPa、切线模量为 2.8GPa。

表 19-1 给出了焊接工件的导热系数、比热容和密度随温度的变化值。

表 19-1　与温度相关的材料参数

温　　度	0	200	400	600	800	1000
热传导系数	16	19	21	24	29	30
比热容	500	540	560	590	600	610
密度	7894	7744	7631	7518	7406	7406

为了高温焊接 304L 不锈钢板，因此轴肩为硬质合金，假设在整个焊接过程其应力-应变关系为线弹性。具体材料参数为：弹性模量为 680GPa，泊松比 0.22，导热系数为 100W/（m·℃），比热容为 750J/（kg·℃），密度为 4280kg/m^3。本实例假设摩擦塑性功转换成热的效率为 80%。两个焊接工件之间的热接触导热系数为 2E06W/（m·℃），轴肩与焊接工件之间的热接触导热系数为 10 W/（m·℃），轴肩与平板之间热分配的权重因子为 0.95，轴肩底面与焊接工件之间的最大摩擦应力为 500GPa。轴肩与焊接工件平板之间的摩擦因数随着温度发生变化，表 19-2 给出了不同温度下的摩擦因数。

表 19-2　摩擦因数与温度的关系

温　　度	25	200	400	600	800	1000
摩擦因数	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2

19.4 单元的选择

本章实例选取三维耦合场单元 SOLID226 模拟搅拌摩擦焊接的热-结构耦合问题。使用接触向导定义以下三个接触对：两块焊接工件之间的接触、轴肩与焊接工件之间的接触和刚性面约束，并且激活接触分析的投影面方法。

19.5 边界条件和载荷

19.5.1 热边界条件

图 19-2 给出了搅拌摩擦焊的热边界条件施加示意图，本实例的热边界条件主要为热对流边界，其中在焊接工件顶部，侧面和轴肩的圆柱面上的表面传热系数为 30W/（m·℃），

焊接工件底部的热表面传热系数为 300 W/（m·℃）。焊接工件和轴肩的初始温度为 25℃。

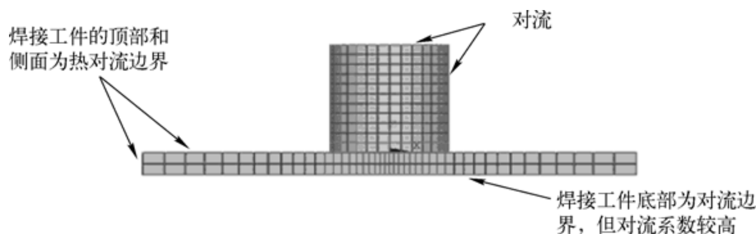


图 19-2　热边界条件施加示意图

19.5.2 力学边界条件

约束固定端的三个方向平动自由度，固定端的宽度为每个平板宽度的 0.2，约束平板的底面的 z 方向位移，图 19-3 给出了施加力学边界条件后的有限元模型。

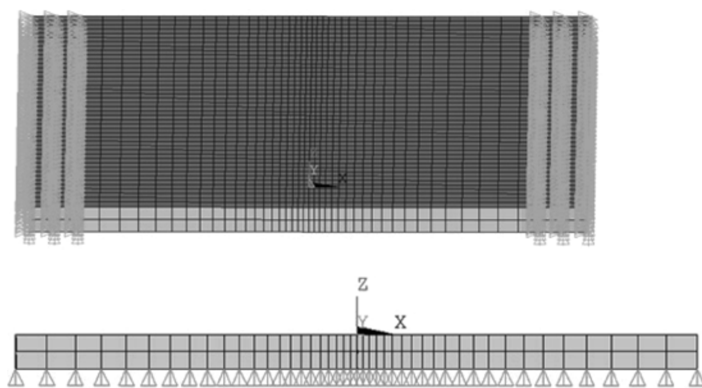


图 19-3　施加力学边界条件后的有限元模型

19.5.3 载荷

搅拌摩擦焊接包括三个主要阶段。

（1）侵入阶段。轴肩慢慢地侵入焊接工件。

（2）轴肩驻留阶段。在该阶段轴肩开始转动，在轴肩与焊接工件之间发生摩擦并产生热量，直到焊接工件的温度达到焊接的温度为止。

（3）轴肩移动阶段。转动的轴肩沿着焊接线移动。

表 19-3 给出了三个阶段的力学边界条件

表 19-3　载荷步

载 荷 步	时间周期（s）	控制节点上的载荷	边 界 条 件
1	1	位移边界条件	UZ=-7.95E-7m
2	5.5	转动边界条件	ROZ=60r/min
3	22.5	转动位移加平动位移	ROZ=60r/min；UY=60.96E-3m

19.6 GUI 操作



19.6.1 前处理

1. 定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 ringforging，单击“OK”按钮。

2. 定义参数

在命令输入窗口中输入：L=76.2E-03，W=31.75E-03，T=3.18E-03，R1=7.62E-03，H=15.24E-03，L1=R1，L2=L-L1。

3. 选择单元

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Coupled Filed，然后在右边选择 Brick 20 node 226 单元，单击“OK”按钮。

（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择 SOLID226，然后单击 Options 选项，弹出 SOLID226 单元类型关键字设置面板，如图 19-4 所示，设置分析类型（Analysis Type）为热-结构（Structural-thermal），单击“OK”按钮；返回单元类型界面，然后单击“Close”按钮关闭对话框。

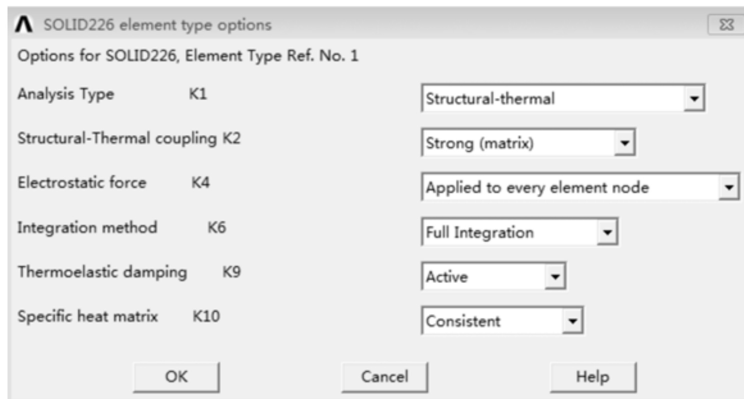


图 19-4 SOLID226 单元类型关键字设置面板

4. 定义材料模型

（1）定义焊接板的材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，如图 19-5 所示，输入 EX=1.93E11、PRXY=0.3，单击“OK”按钮，关闭对话框，继续单击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，弹出的双线性等向强化模型材料定义面板，如图 19-6 所示，输入屈服

应力=0.29GPa、切线模量为 2.8GPa。继续单击 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic，弹出热膨胀系数的定义面板，输入热膨胀系数为 1.875E-5，单击“OK”按钮。继续单击 Thermal→Heat Generation Rate，弹出热生成率定义面板，输入热生成率为 0.8，单击“OK”按钮。

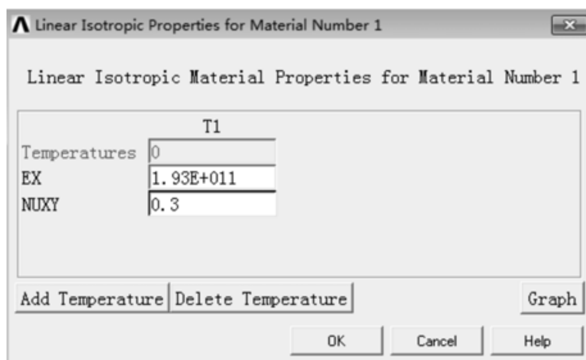


图 19-5　各向同性线弹性材料定义面板

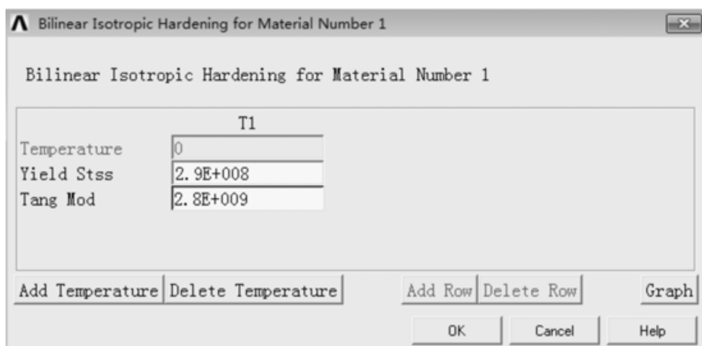


图 19-6　双线性等向强化模型材料定义面板

继续单击 Thermal→Specific Heat，弹出材料比热容定义面板，如图 19-7 所示，连续单击“Add Temperatures”按钮 6 次，实现添加 6 个温度点，按图 19-7 输入 6 个温度和对应的材料比热值，输入完毕后，单击“OK”按钮。继续单击 Thermal→Conductivity，弹出材料热传导系数定义面板，如图 19-8 所示，连续单击“Add Temperatures”按钮 6 次，实现添加 6 个温度点，按图 19-8 输入 6 个温度和对应的材料热传导系数，输入完毕，单击“OK”按钮。

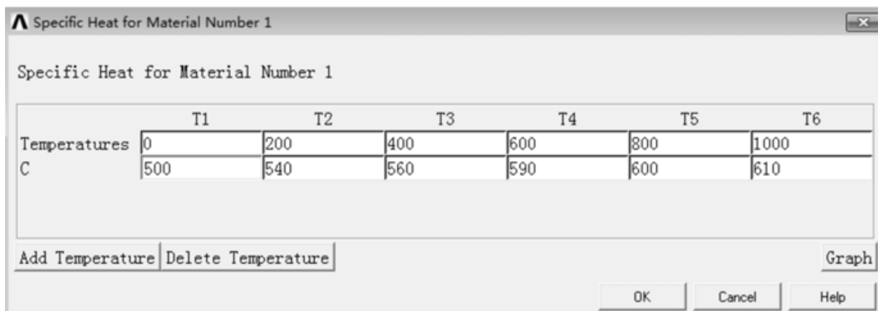
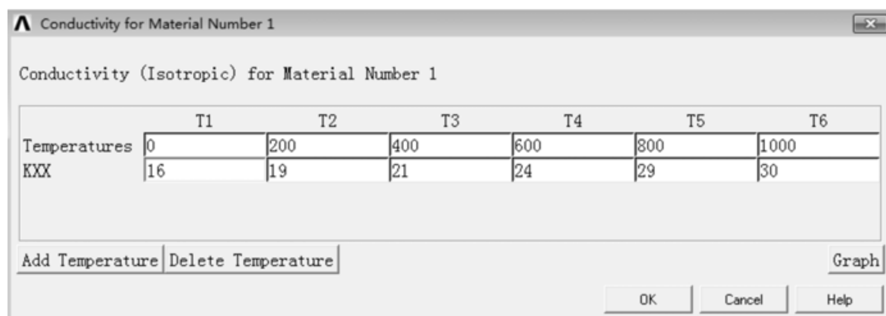


图 19-7　材料比热定义面板

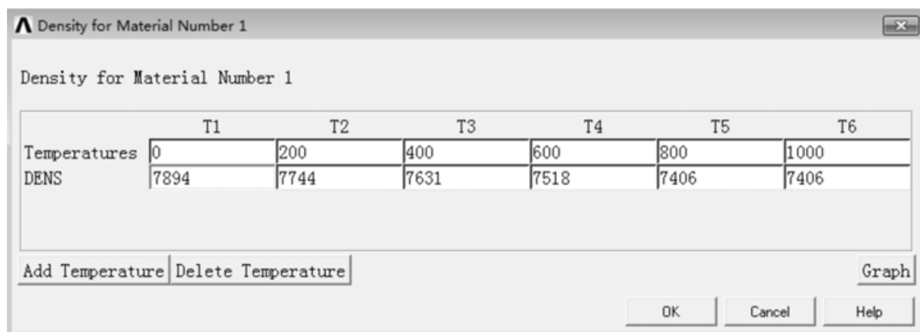

Conductivity for Material Number 1

Conductivity (Isotropic) for Material Number 1

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Temperatures	0	200	400	600	800	1000
KXX	16	19	21	24	29	30

图 19-8 材料导热系数定义面板

继续单击 Structural→Density，弹出材料热传导系数定义面板，如图 19-9 所示，连续单击“Add Temperatures”按钮 6 次，实现添加 6 个温度点，按图 19-9 输入 6 个温度和对应的材料密度，输入完毕，单击“OK”按钮。


Density for Material Number 1

Density for Material Number 1

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Temperatures	0	200	400	600	800	1000
DENS	7894	7744	7631	7518	7406	7406

图 19-9 材料密度定义面板

（2）定义焊接工具轴肩的材料模型

单击 Material→New Model，在弹出的对话框框中输入 2，单击“OK”按钮。单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，弹出各向同性线弹性材料定义面板，图 19-5 所示，输入 EX=680E9、PRXY=0.22，单击“OK”按钮，继续单击 Thermal→Specific Heat，弹出材料比热容定义面板，如图 19-7 所示，直接输入比热 750，继续单击 Thermal→Conductivity，弹出材料热传导系数定义面板，如图 19-8 所示，直接输入热传导系数 100，单击“OK”按钮，继续单击 Structural→Density，弹出材料密度定义面板，如图 19-9 所示，直接输入密度 4280，单击“OK”按钮，关闭对话框，单击 Material→Exit，退出定义材料模型行为的面板。

（3）定义随温度变化的摩擦因数

该材料模型暂不支持 GUI 操作，输入以下命令流：

```
TB,FRIC,3,6,
TBTEMP,25
TBDATA,1,0.4
TBTEMP,200.0
TBDATA,1,0.4
TBTEMP,400.0
```

```
TBDATA,1,0.4
TBTEMP,600.0
TBDATA,1,0.3
TBTEMP,800.0
TBDATA,1,0.3
TBTEMP,1000.0
TBDATA,1,0.2
```

5．建立模型

（1）定义长方体

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions，弹出通过尺寸创建长方体面板，如图 19-10 所示，输入 X1=0、X2=W、Y1=-L1、Y2=L2、Z1=0、Z2=-T，单击“Apply”按钮，继续输入 X1=0、X2=-W、Y1=-L1、Y2=L2、Z1=0、Z2=-T，单击“OK”按钮。

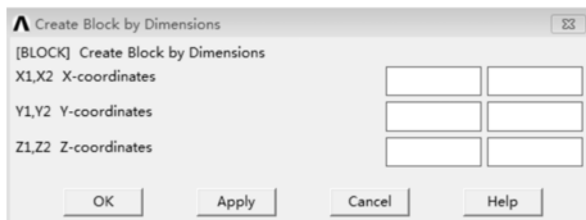


图 19-10 通过尺寸创建长方体面板

（2）定义圆柱体

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By Dimensions，弹出通过尺寸创建圆柱体面板，如图 19-11 所示，按图 19-11 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

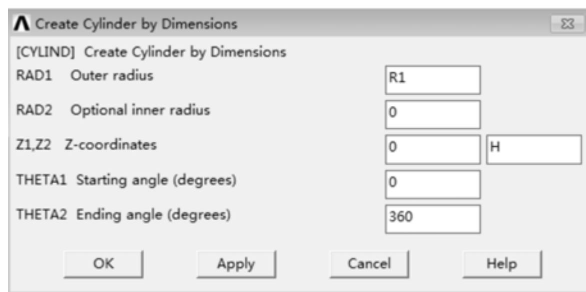


图 19-11 通过尺寸创建圆柱体面板

6．网格划分

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）设置线网格

单击网格划分工具面板上的尺寸控制区域中 Lines 设置 Set 按钮，弹出拾取对话框，拾

取线 L7 和 L17，单击“OK”按钮，弹出线网格控制面板，如图 19-12 所示，按图 19-12 进行设置。输入完毕，单击“Apply”按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L5 和 L19，单击“OK”按钮，弹出如图 19-12 所示的线网格控制面板，输入单元数量为 22，空间比例（Spacing ratio）为 5，单击“Apply”按钮，弹出拾取对话框，拾取线 L8 和 L18，弹出线网格控制面板，如图 19-12 所示，输入单元数量为 44，空间比例为空值，单击“OK”按钮。



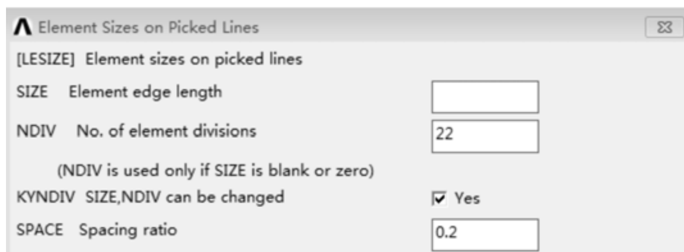


图 19-12 线网格控制面板

（3）设置网格划分方法

设置网格形状为 Hex/Wedge，划分方法为 Sweep。

（4）设置单元中间节点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesher Opts，弹出单元中间节点设置面板，如图 19-13 所示，设置不使用中间节点（No midside nodes），单击“OK”按钮。



图 19-13 单元中间节点设置面板

（5）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取两个平板，单击“OK”按钮。

（6）设置网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 19-14 所示，按照图 19-14 进行设置，单击“OK”按钮。

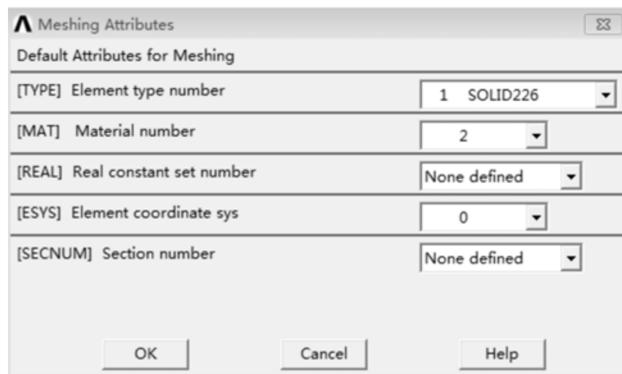


图 19-14 网格属性设置面板

（7）设置总体网格尺寸

选择如图 19-15 所示的网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 19-16 所示。

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 0.0015，单击“OK”按钮。



图 19-15　网格划分工具面板中尺寸控制子面板

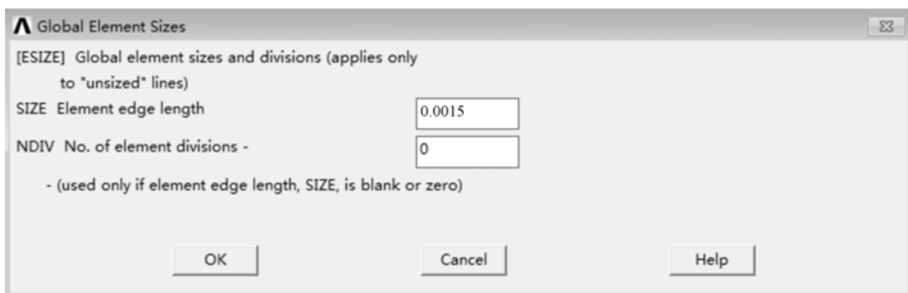


图 19-16　总体网格尺寸设置面板

（8）划分网格

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取轴肩，单击“OK”按钮。

7．定义接触对

（1）打开接触管理器

单击主菜单中的图标，弹出接触管理器面板，如图 19-17 所示。

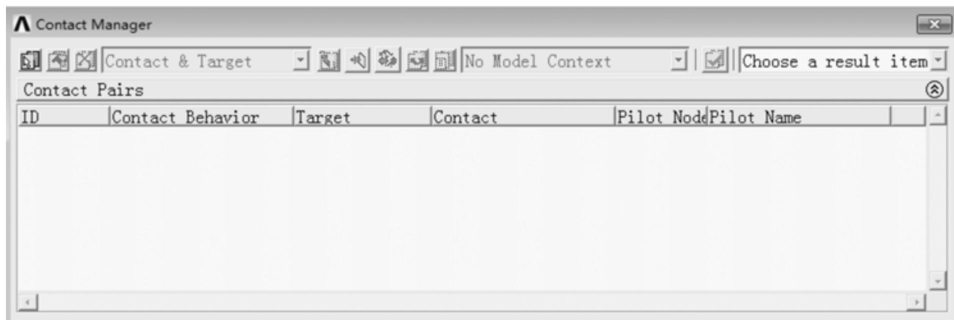


图 19-17　接触管理器面板

（2）定义两个焊接平板之间的接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 19-18 所示，在该面板中设置目标面为面（Areas），设置目标单元类型为柔性体（Flexible），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取面 A5，单击 Apply，弹出接触面及接触单元

类型设置面板，如图 19-19 所示，在该面板中设置接触面为面（Areas），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取面 A12，单击“Apply”按钮，单击图 19-19 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，单击“Optional settings”按钮，弹出接触属性定义面板，单击“Basic”按钮，弹出接触属性基本选项设置面板，如图 19-20 所示，设置接触检查算法（Contact Detection）为基于投影面（On nodes-Surface projection），单击“Thermal”按钮，弹出接触属性热选项设置面板，如图 19-21 所示，输入热接触导热系数（Thermal Contact Conductance）为 2E6，其他保持默认，单击“OK”按钮，返回创建接触对面板，单击“Create”按钮来创建接触对。





图 19-18　目标面及目标单元类型设置面板图

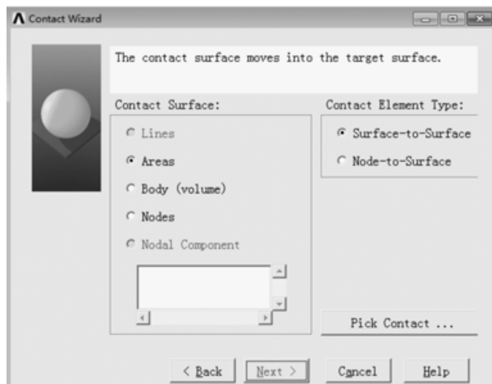


图 19-19　接触面及接触单元类型设置面板

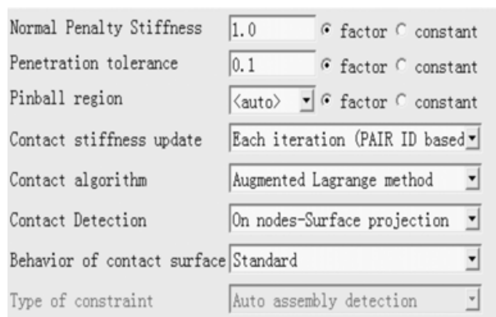


图 19-20　接触属性基本选项设置面板

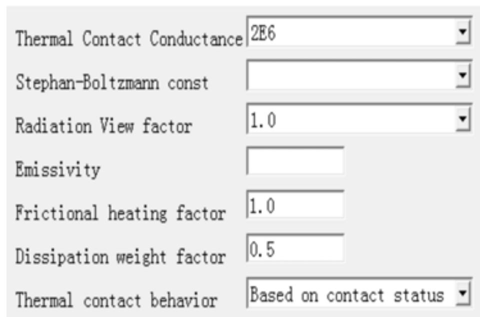


图 19-21　接触属性热选项设置面板

（3）定义轴肩底面与焊接工件表面之间的接触

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 19-18 所示，在该面板中设置目标面为面（Areas），设置目标单元类型为柔性体（Flexible），单击拾取目标面按钮（Pick Target），弹出拾取对话框，拾取面 A13、A15 和 A16，单击“Apply”按钮。弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 19-19 所示，在该面板中设置接触面为面（Areas），接触单元类型为面-面接触（Surface-to-Surface），单击拾取接触单元按钮（Pick Contact），拾取面 A8 和 A2，单击“Apply”按钮。单击图 19-19 中的“Next”按钮，弹出创建接触对面板，单击“Optional settings”按钮，弹出接触属性定义面板，单击“Friction”按钮，弹出接触属性摩擦选项设置面板，如图 19-22 所示，设置材料 ID 号为 3，最大摩擦应力（Maximum friction

stress）为 500MPa，刚度矩阵为非对称矩阵（Unsymmetric），单击“Initial penetration”按钮，弹出接触属性初始调整选项设置面板，如图 19-23 所示，设置初始透穿为 Exclude everything，自动接触调整为 Close gap/Reduce penetration，单击“Thermal”按钮，弹出接触属性热选项设置面板，如图 19-21 所示，输入热接触导热系数（Thermal Contact Conductance）为 10，热分配的权重因子（Dissipation weight factor）为 0.95，其他保持默认，单击“OK”按钮，返回创建接触对面板，单击“Create”按钮来创建接触对。

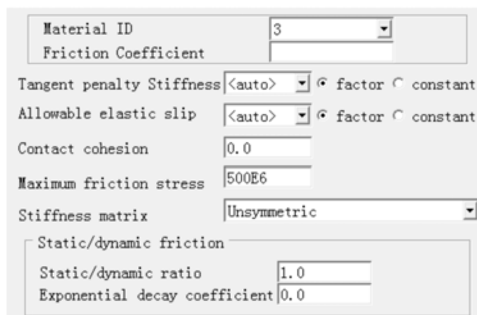


图 19-22　接触属性摩擦选项设置面板

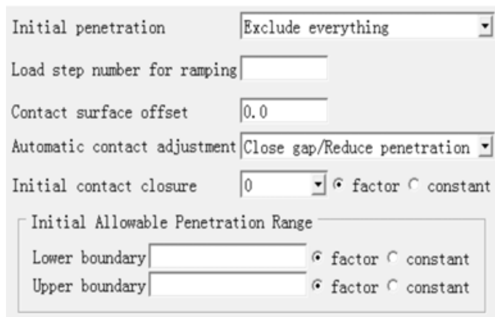


图 19-23　接触属性初始调整选项设置面板

（4）定义带控制节点的轴肩顶面刚性面约束

单击接触管理器中的图标，弹出目标面及目标单元类型设置面板，如图 19-18 所示，设置目标单元仅有控制节点（Pilot Node Only），单击“Next”按钮，弹出如图 19-24 所示的设置控制节点位置面板，保持默认设置，单击“Next”按钮，弹出接触面及接触单元类型设置面板，如图 19-19 所示，单击“Pick Contact”按钮，弹出拾取对话框，拾取轴肩顶面 A14，单击“OK”按钮，返回图 19-19，单击“Next”按钮，弹出设置约束面板，如图 19-25 所示，设置约束表面类型为刚性约束，施加目标单元的方法为用户指定，设置完毕，单击“OK”按钮。

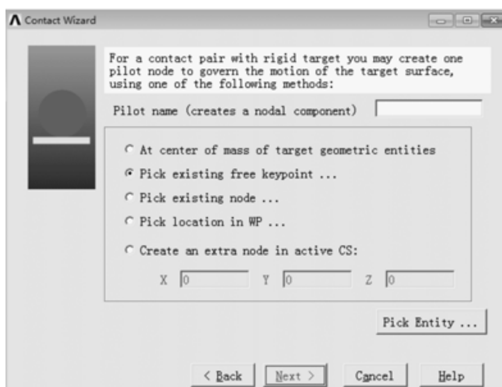


图 19-24　设置控制节点位置面板

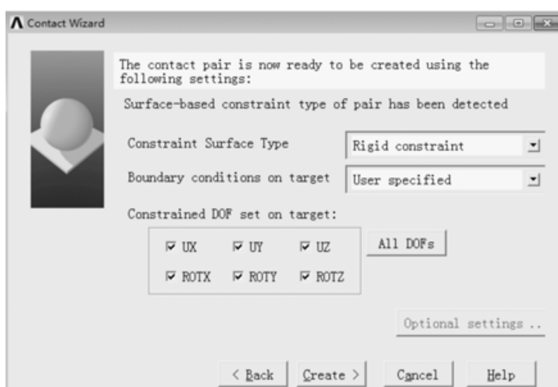


图 19-25　设置约束面板

19.6.2 求解

1．设置分析类型

（1）激活瞬态动力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面

板，如图 19-26 所示，选择瞬态动力学分析（Transient），单击“OK”按钮，弹出瞬态动力学分析设置面板，如图 19-27 所示，选择求解方法为完全法（Full），其他保持默认，单击“OK”按钮。

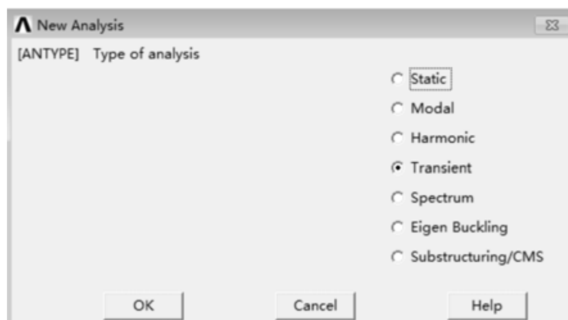


图 19-26　分析类型设置面板

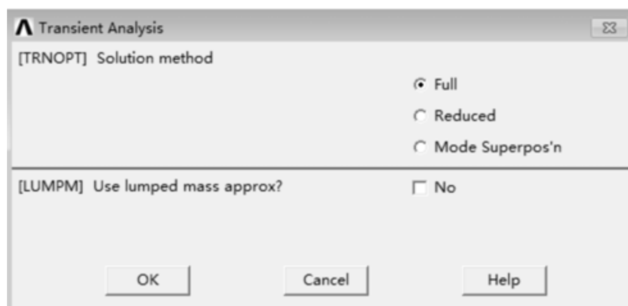


图 19-27　瞬态动力学分析设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出瞬态分析选项设置面板，如图 19-28 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保持默认设置，单击“OK”按钮。

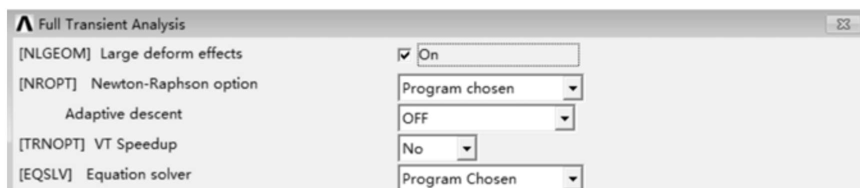


图 19-28　瞬态分析选项设置面板

2．定义边界条件

（1）定义力学边界条件

1）选择焊接平板一侧节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 19-29 所示，按照图 19-29 进行设置，单击“OK”按钮。

2）选择焊接平板另一侧节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择实体设置面板，如图 19-30 所示，按照图 19-30 进行设置，单击“OK”按钮。

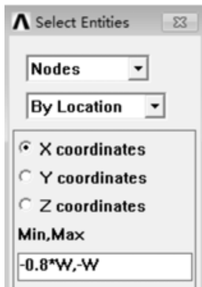


图 19-29　选择实体设置面板（一侧）

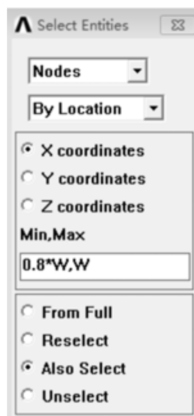


图 19-30　选择实体设置面板（另一侧）

3）施加位移约束

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击 Pick All，在弹出的对话框中选择约束类型为 UX、UY 和 UZ，单击“OK”按钮。

4）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

5）施加焊接工件底面 z 方向约束

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas，弹出拾取对话框，拾取面 A1 和 A7，单击“OK”按钮，弹出在面上施加约束面板，选择约束类型为 UZ，单击“OK”按钮。

（2）定义热边界条件

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Areas，弹出拾取对话框，拾取焊接工件的顶面和侧面以及轴肩的顶面和侧面，单击“OK”按钮，弹出施加对流边界条件定义面板，如图 19-31 所示，输入对流系数（Film coefficient）为 30，环境温度（Bulk temperature）为 25，单击“OK”按钮。

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Areas 弹出拾取对话框，继续拾取焊接工件的底面 A1 和 A7，单击“OK”按钮，弹出施加对流边界定义面板，如图 19-31 所示，输入对流系数 300、环境温度 25，单击“OK”按钮。

3．求解设置

（1）设置参考温度

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Reference Temp，弹出定义参考温度面板，输入参考温度 25，单击“OK”按钮。

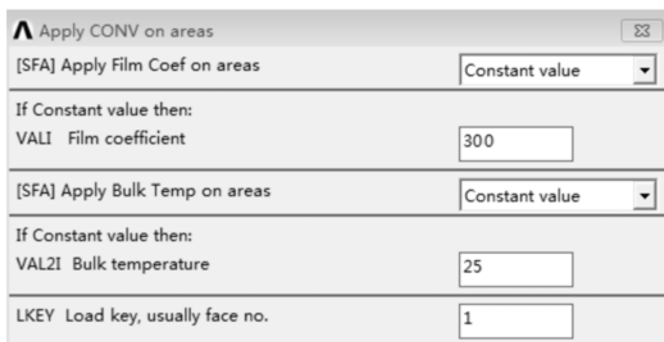


图 19-31 施加对流边界条件定义面板

（2）设置初始温度

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Uniform Temp，弹出定义均匀温度面板，输入初始均匀温度 25，单击“OK”按钮。

4．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中，选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）激活线性搜索

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Line Search，弹出线性搜索定义面板，如图 19-32 所示，选择 ON，单击“OK”按钮。

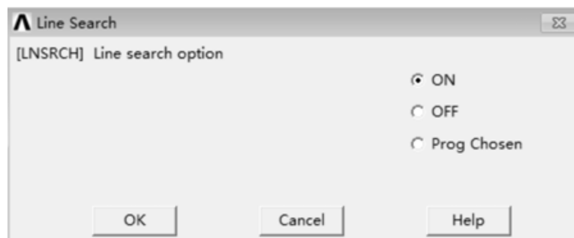


图 19-32 线性搜索定义面板

（3）设置二分法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Cutback Control，弹出二分法控制面板，如图 19-33 所示，设置控制的物理量为等效塑性应变（Eqv plast strain），输入限制值为 0.15，单击“OK”按钮。

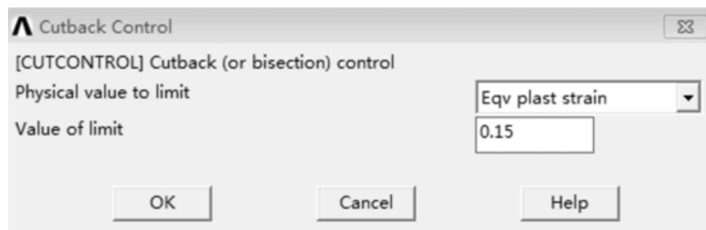


图 19-33 二分法控制面板

（4）关闭结构瞬态效应激活热瞬态效应

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time Integration→Newmark Parameters，弹出时间积分控制面板，如图 19-34 所示，打开瞬态热效应，关闭瞬态结构效应，单击“OK”按钮。

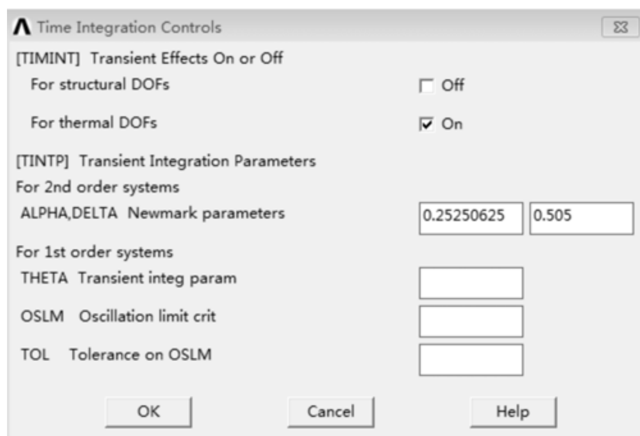


图 19-34 时间积分控制面板

5. 求解第一个载荷

（1）定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取控制节点 9793，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加位移约束面板，如图 19-35 所示，按照图 19-35 进行设置。设置完毕，单击“OK”按钮。

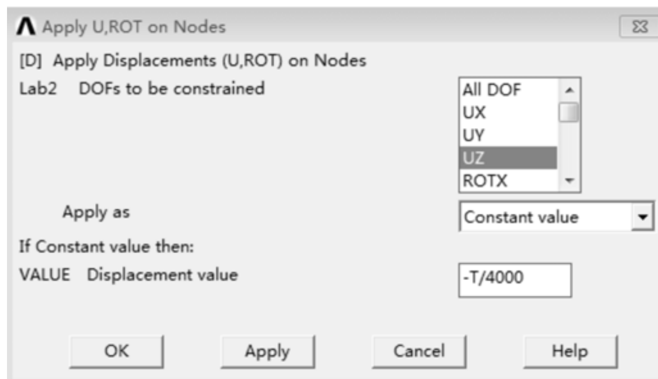


图 19-35 在节点处施加位移约束面板

（2）定义求解时间步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 19-36 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 10，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），最大子步数为 1000，最小子步数为 100，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

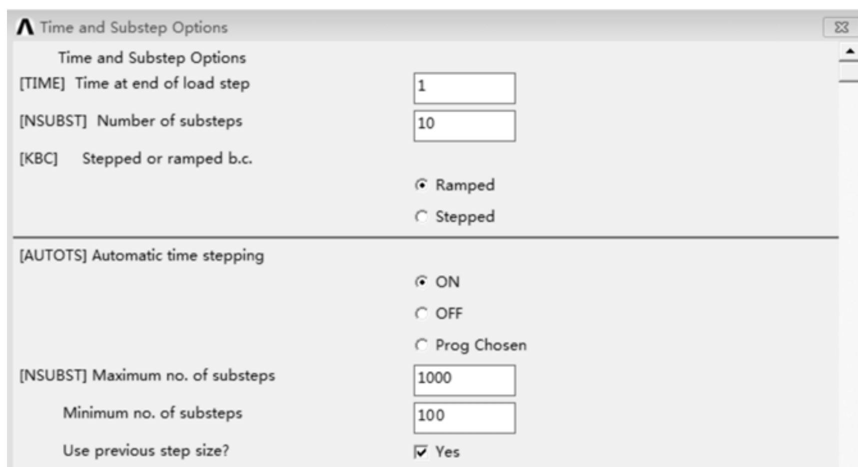


图 19-36 时间和子步选项设置面板

（3）开始求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

6．求解第二个载荷

（1）定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取控制节点 9793，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加位移约束面板，如图 19-37 所示，按照图 19-37 进行设置，设置完毕，单击“OK”按钮。

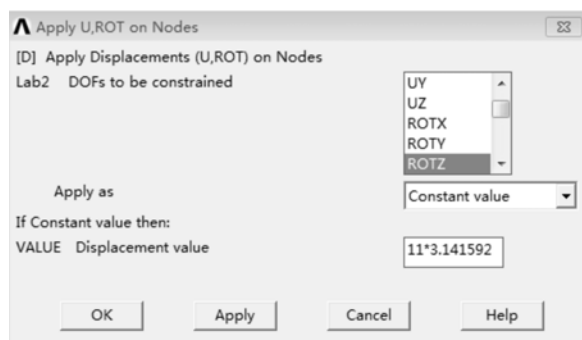


图 19-37 在节点处施加位移约束面板

（2）定义求解时间步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time-Time Step，弹出时间和时间步选项设置面板，如图 19-38 所示，计算时间（TIME）输入 6.5，时间步尺寸输入 0.1，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），最小时间步尺寸为 0.001，最大时间步数为 0.2，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（3）开始求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击

“OK”按钮，开始求解。

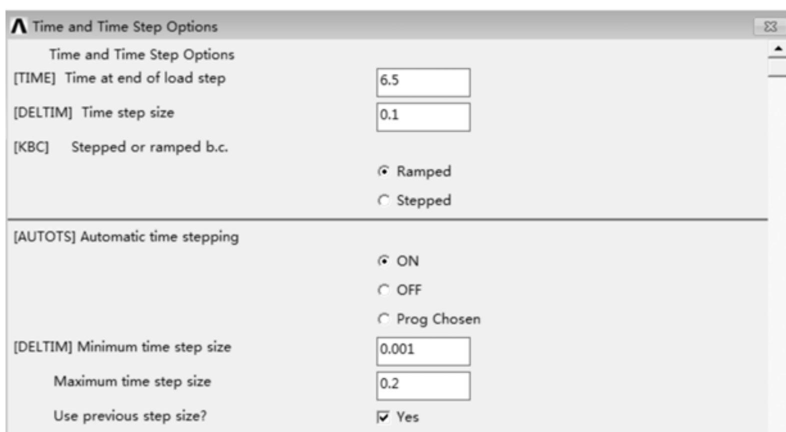


图 19-38 时间和时间步选项设置面板

7．求解第三个载荷

（1）定义载荷

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取控制节点 9793，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加位移约束面板，如图 19-37 所示，选择约束方向为 UY 并输入对应的位移值为 60.96E-03，单击“Apply”按钮，继续拾取控制节点 9793，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加位移约束面板，如图 19-37 所示，选择约束方向为 ROTZ 并输入对应的位移值为 45*3.141592，单击“OK”按钮。

（2）定义求解时间步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time-Time Step ，弹出时间和时间步选项设置面板，如图 19-38 所示，计算时间（TIME）输入 6.5，时间步尺寸输入 0.1，载荷加载方式为斜坡加载（Ramped），打开自动时间步（ON），最小时间步尺寸为 0.001，最大时间步数为 0.2，其他保持默认设置，单击“OK”按钮。

（3）开始求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

19.6.3 后处理

图 19-39～图 19-50 分别给出了焊接过程中，不同时刻的位移、温度和等效应力云图，由图 19-39～图 19-48 可知 ANSYS 可以很好地模拟搅拌摩擦焊接中初始升温和焊接过程中的应力。图 19-51 和图 19-52 分别给出了 3311 节点和 1244 节点处温度与时间的关系，由图 19-51、19-52 可知该节点处的温度在 6.5s 时刻具有最高温度，然后缓慢降低；图 19-53 给出了 3313 节点处的等效应力与时间的关系，由图 19-53 可知，该点的最大等效应力在 6.5s 时刻最大，然后迅速减小；图 19-54 给出了 1270 节点处的等效应力与时间的关系，由图 19-54 可知，该点等效应力随时间先增大然后达到一个稳定值。

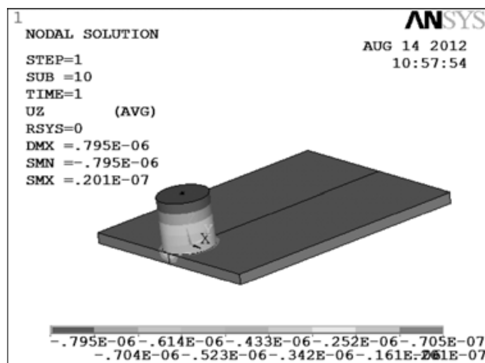


图 19-39 1s 时刻的 *z* 方向位移云图

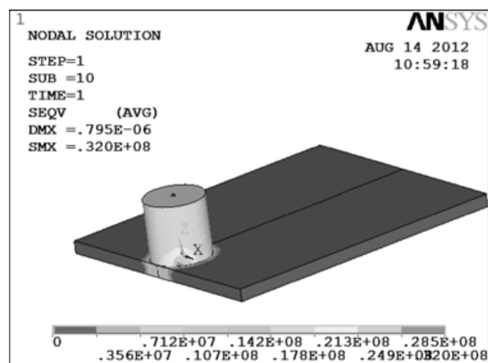


图 19-40 1s 时刻的等效应力云图

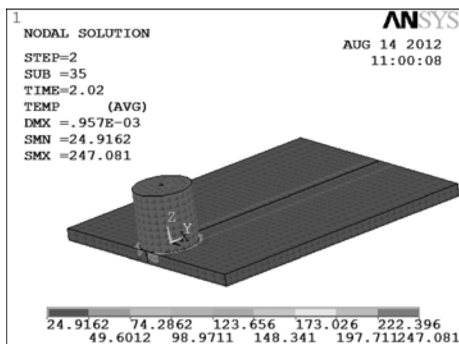


图 19-41 2.02s 时刻的温度云图

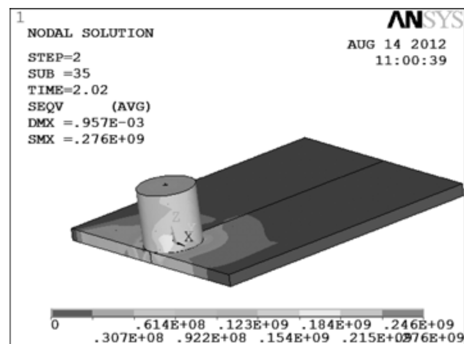


图 19-42 2.02s 时刻的等效应力云图

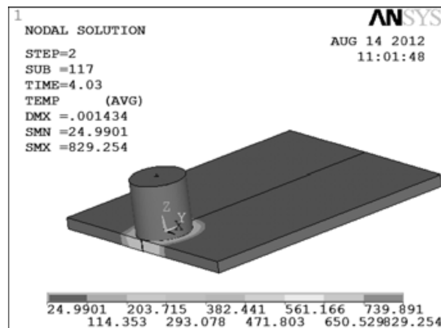


图 19-43 4.03s 时刻温度云图

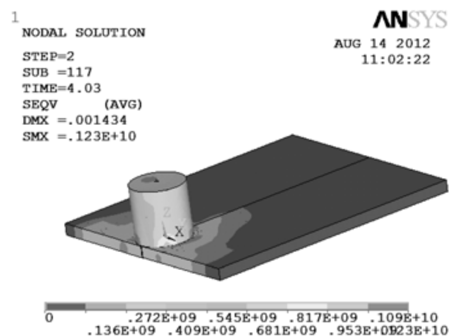


图 19-44 4.03s 时刻等效应力云图

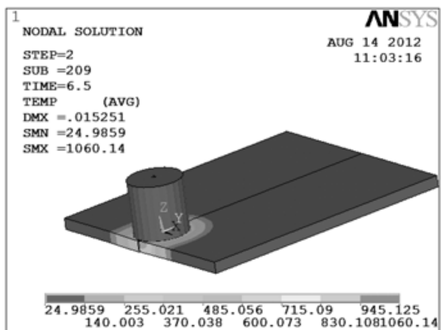


图 19-45 6.5s 时刻温度云图

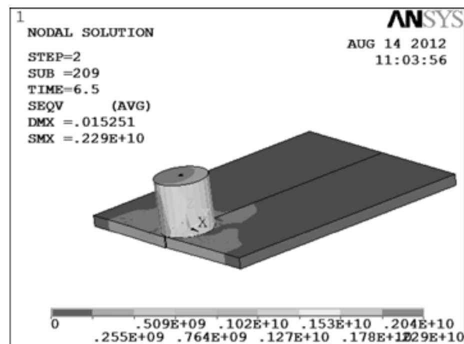


图 19-46 6.5s 时刻等效应力云图

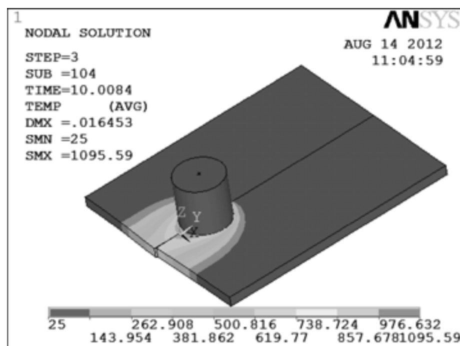


图 19-47　10.0084s 时刻温度云图

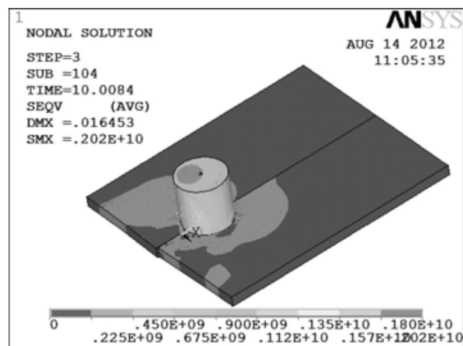


图 19-48　10.0084s 时刻等效应力云图

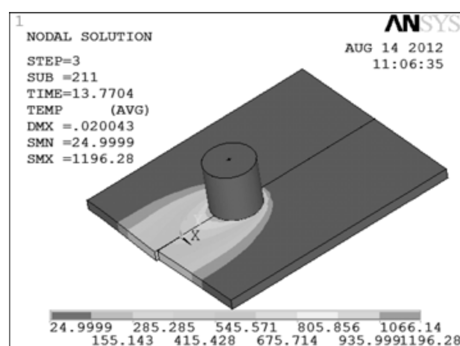


图 19-49　13.7704s 时刻温度云图

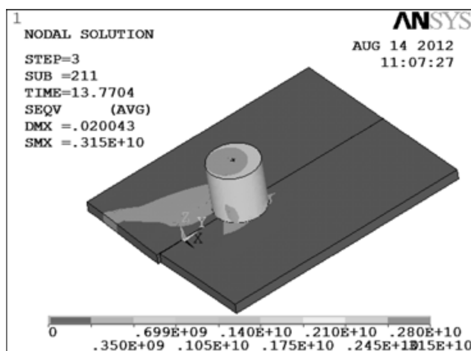


图 19-50　13.7704s 时刻等效应力云图

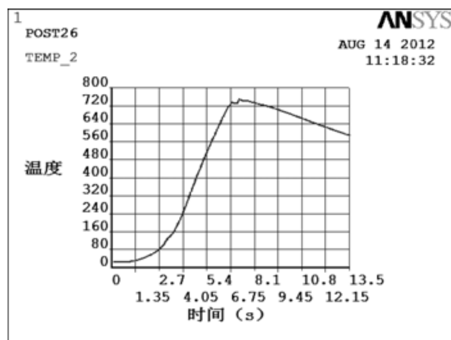


图 19-51　3311 节点处温度与时间的关系

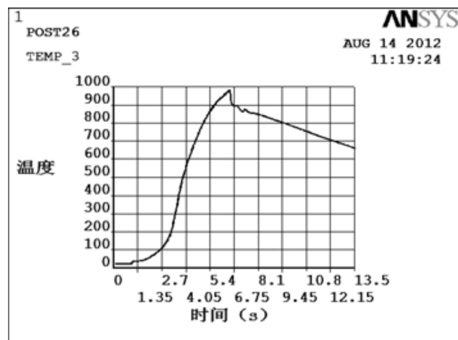


图 19-52　1244 节点处温度与时间的关系

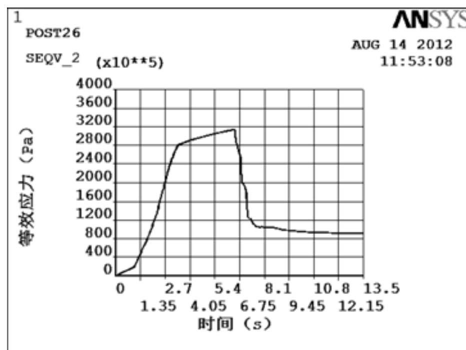


图 19-53　3313 节点处的等效应力与时间的关系

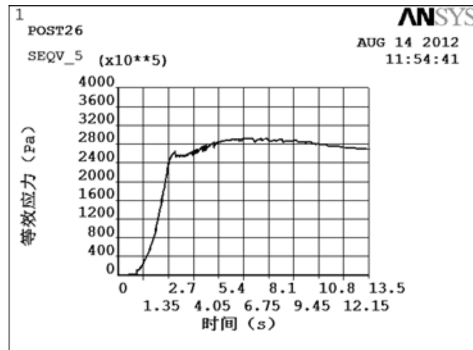


图 19-54　1270 节点处的等效应力与时间的关系



19.7 命令流

```
/FILNAME,Friction Stir Welding,0
/PREP7
L=76.2E-03                !每一个平板的长度
W=31.75E-03               !每一个平板的宽度
T=3.18E-03                !每一个平板的厚度
R1=7.62E-03               !焊机工具的轴肩半径
H=15.24E-03               !轴肩的高度 H
L1=R1                     !轴肩中心线在焊接线上的起始位置
L2=L-L1

ET,1,SOLID226,11     !定义耦合场单元，并将关键字 KEYOPT（1）设置为 11 来模拟热结构分析。
MP, EX,1,193E9            !弹性模量 (N/M^2)
MP, NUXY,1,0.3            !泊松比
MP, ALPX,1,1.875E-5       !热膨胀系数
MP,QRATE,1,0.8            !摩擦塑性功转换成热的效率 80%

/COM, *BISO MATERIAL MODEL
TB,BISO,     1,     1     !双线性等向强化模型
TBDATA,1,290E6,2.8E9      !屈服应力和切线模量

MPTEMP,1,              0, 200, 400, 600, 800,1000
MPDATA,KXX,1,1,     16,    19,    21,    24,    29,30         !热传导系数 THERM COND.(W/(m·℃))
MPDATA,C,1,1,       500, 540, 560, 590, 600,610 !比热容(J/(kg·℃))
MPDATA,DENS,1,1,7894,7744,7631,7518,7406,7406 !kg/m^3

/COM, 定义 PCBN 焊接工具的材料参数
MP,   EX,2,680E9          !弹性模量(Pa)
MP,NUXY,2,0.22            !泊松比
MP, KXX,2,100             !热传导系数(W/(m·℃))
MP,    C,2,750            !比热容(J/(kg·℃))
MP,DENS,2,4280            !密度,kg/m^3

TB,FRIC,3,6,
TBTEMP,25
TBDATA,1,0.4
TBTEMP,200.0
TBDATA,1,0.4
TBTEMP,400.0
TBDATA,1,0.4
TBTEMP,600.0
TBDATA,1,0.3
TBTEMP,800.0
TBDATA,1,0.3
```

```
TBTEMP,1000.0
TBDATA,1,0.2

BLOCK,0, W,-L1,L2,0,-T
BLOCK,0,-W,-L1,L2,0,-T
CYLIND,R1,0,0,H,0,360,

LESIZE,17, , ,17,0.16, , , ,1
LESIZE,5, , ,17,6.25, , , ,1
LESIZE,19, , ,17,6.25, , , ,1
LESIZE,7, , ,17,0.16, , , ,1

LESIZE,21, , ,2, , , , ,1
LESIZE,10, , ,2, , , , ,1
LESIZE,8, , ,37,
LESIZE,18, , ,37,

MSHMID,2
VSWEEP,1
VSWEEP,2
MAT,2
ESIZE,0.002
VSWEEP,3

!定义焊接平板之间的接触
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,
MAT,1
MP,EMIS,1,
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,2e6,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
RMORE,10.0
KEYOPT,3,4,3
```



```
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,5,0
KEYOPT,3,1,1
!建立目标面
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,2
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
!建立接触面
ASEL,S,,,12
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
```

```
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
R,3,0,0,1, 0.1,0,0
RMORE,0,0,1e+020, 0,1,0
RMORE,0,2000000,1, 0,1,0.5
RMORE,,,1, 0,0,
RMORE,,,,,1000

!定义轴肩底面与焊接工件表面的接触

!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MAT,3
MP,EMIS,3,0
R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
R,4,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,500e6,0.0,1.0,
RMORE,0.0,10,1.0,,1.0,0.95
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,5,4,0
KEYOPT,5,5,3
KEYOPT,5,7,0
KEYOPT,5,8,0
KEYOPT,5,9,1
KEYOPT,5,10,2
KEYOPT,5,11,0
KEYOPT,5,12,0
KEYOPT,5,2,0
```



```
KEYOPT,4,5,0
KEYOPT,5,1,1
!生成目标面
ASEL,S,,,13
ASEL,A,,,15
ASEL,A,,,16
CM,_TARGET,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
!生成接触面
ASEL,S,,,2
ASEL,A,,,8
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
```

```
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT


!定义轴肩的刚性面约束
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
!定义基于面约束的接触对
MAT,1
R,5
REAL,5
ET,6,170
ET,7,174
KEYOPT,7,12,5
KEYOPT,7,4,2
KEYOPT,7,2,2
KEYOPT,6,2,1
KEYOPT,6,4,111111
KEYOPT,7,1,1
TYPE,6
!创建一个控制节点
!在接触几何实体质心创建单元
N,9793, -8.61577111833e-019,4.49281288333e-019,0.01524
TSHAP,PILO
E,9793
!创建接触面
ASEL,S,,,14
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,7
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 !选择节点
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
```



```
ESEL,R,REAL,,5
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,6
ESEL,A,TYPE,,7
ESEL,R,REAL,,5
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/MREP,EPLOT
/SOLU
ANTYPE,4                        !激活瞬态动力学分析
NLGEOM,ON                       !激活大变形分析
!NROPT,UNSYM                    !使用非对称的完全牛顿-拉弗森算法
!力学边界条件
NSEL,S,LOC,X,-0.8*W,-W
NSEL,A,LOC,X,0.8*W,W
D,ALL,UZ,0                      !约束所有节点 Z 方向的位移
D,ALL,UY,0                      !约束所有节点 Y 方向的位移
D,ALL,UX,0                      !约束所有节点 X 方向的位移
ALLSEL,ALL
DA,1,UZ,
DA,7,UZ,
!热边界条件
SFA,11,1,CONV,30,25
SFA,8,1,CONV,30,25
SFA,2,1,CONV,30,25
SFA,6,1,CONV,30,25
SFA,4,1,CONV,30,25
SFA,10,1,CONV,30,25
SFA,9,1,CONV,30,25
```

```
SFA,3,1,CONV,30,25
SFA,15,1,CONV,30,25
SFA,16,1,CONV,30,25
SFA,14,1,CONV,30,25
SFA,1,1,CONV,300,25
SFA,7,1,CONV,300,25
TREF,25                          !定义参考温度为 25℃
TUNIF,25,                        !定义节点的初始温度为 25℃
OUTRES,ALL,ALL
LNSRCH,1
CUTCONTROL,PLSLIMIT,0.15 !
TIMINT,0,STRUC                   !关闭结构动力学效应
pscontrol,all,on
!*
RESCONTROL,DEFINE,ALL,ALL,0
!LOAD STEP1
D,9793,UZ,-T/4000    !轴肩工具的压入工作面的深度 TOOL PLUNGES INTO THE WORKPIECE
D,9793,UX,0
D,9793,UY,0
D,9793,ROTX,0
D,9793,ROTY,0
D,9793,ROTZ,0
TIME,1
AUTOTS,ON                        !激活自动时间步
KBC,0
NSUBST,10,1000,10
LSWRITE,1
!LOAD STEP2
TIME,6.5
D,9793,ROTZ,11*3.141592          !轴肩工具的转速, 60r/min
DELTIM,0.01,0.004,0.2
LSWRITE,2
!LOAD STEP3
TIME,29
D,9793,ROTZ,45*3.141592          !ROTATION OF TOOL,60r/min
D,9793,UY,60.96E-03              !DISPLACEMENT OF TOOL ALONG WELDLINE
DELTIM,0.01,0.004,0.2
LSWRITE,3
LSSOLVE,1,3,1
```



第 20 章　汽车橡胶罩的非线性分析

20.1　引言

本章实例证明了基于接触方法的面投影技术（Surface-projection-based Contact Method）解决高度非线性问题的优点。橡胶罩密封件被广泛地用来包含两个连接体之间的柔性铰。在汽车工业中，橡胶罩密封件被用来包含传动轴以防止外面的灰尘、泥土进入传动轴。本章实例详细介绍了求解包含几何非线性、材料非线性和状态变化非线性的综合问题。

20.2　几何模型

本章实例的模型使用半对称橡胶罩密封模型，如图 20-1 所示。该系统由刚性轴和橡胶罩组成，其中橡胶罩的三维模型通过 ANSYS 进行导入，刚性轴的半径为 14mm、高度为 97mm。

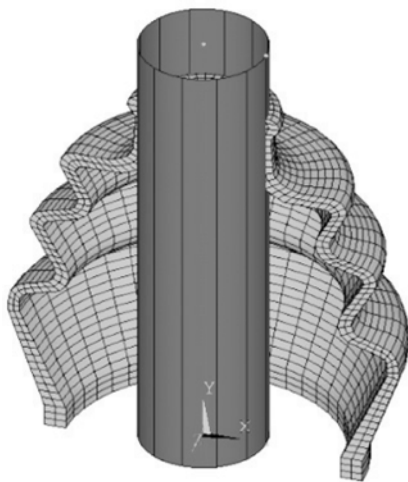


图 20-1　橡胶罩密封件和刚性轴的三维图

20.3　材料的本构模型

橡胶罩由超弹材料组成，本实例假设该超弹材料的应力-应变关系为 Neo-Hookean 模型，其应变能势函数：

$$W = \frac{\mu}{2}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d}(J-1)^2 \qquad (20\text{-}1)$$

式中，μ 为材料的初始切变模量；d 为材料的不可压缩参数。

初始体积模量：

$$K = \frac{2}{d} \qquad (20\text{-}2)$$

本章实例中 μ=1.5MPa，d=0.026MPa。

20.4　单元的选择

本章实例选用 SOLID185 单元模拟橡胶罩，使用 TARGE170 模拟接触对的目标单元，使用 CONTA173 模拟接触对的接触单元，使用 MESH200 辅助划分网格。

20.5 边界条件和载荷

20.5.1 边界条件

如图 20-2 所示，在对称面上施加对称约束，如图 20-3 所示，在橡胶罩的底面施加周向约束，如图 20-4 所示，在橡胶罩的底面外面施加径向位移约束。

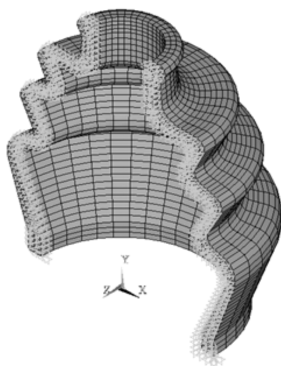


图 20-2 对称面上的边界条件示意图

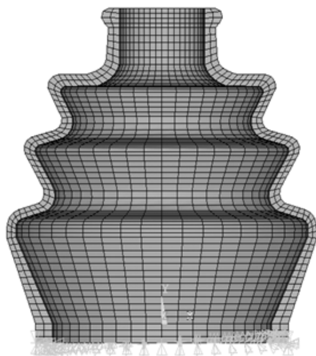


图 20-3 约束橡胶罩底部的周向位移

20.5.2 载荷

该实例共使用三个载荷步施加载荷，第一个载荷步为施加刚性轴与橡胶罩之间的初始干涉；第二个载荷步为将刚性轴向下压缩 10mm；第三个载荷步为将刚性轴转动 0.55rad。

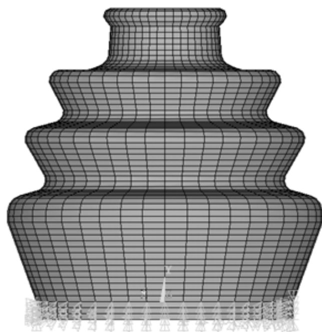


图 20-4 约束橡胶罩底部的径向位移

20.6 GUI 操作

20.6.1 前处理

1．定义文件名

GUI：单击 Utility Menu→File→Change Jobname，弹出一个对话框，在输入栏中输入 FEM of rubber cover，单击“OK”按钮。

2．导入橡胶罩三维模型

GUI：单击 Utility Menu→File→Read Input from，弹出读入文件面板，如图 20-5 所示，选择 bootseal3d.anf，单击“OK”按钮。

3．选择单元

（1）定义单元

GUI：Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击

"Add"按钮，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Brick 8 node 185 单元，单击"Apply"按钮；继续在左边对话框选择 Contact，然后在右边选择 3D Target 170，单击"Apply"按钮；继续在左边对话框选择 Contact，然后在右边选择 4 nd surf 173，单击"Apply"按钮；继续在左边对话框选择 Contact，然后在右边选择 4 nd surf 173，单击"Apply"按钮；继续在左边对话框选择 Not Solved，然后在右边选择 Mesh Facet 200，单击"OK"按钮。



（2）设置单元关键字

在单元类型对话框中选择类型 3 单元 CONTA173，然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置初始透穿/间隙（Initial penetration/gap）为渐进施加方式（Include-ramp），单击"OK"按钮返回单元类型界面；继续选择类型 4 单元 CONTA173，然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中设置接触点检测方法（Cnt Detection or CERIGID/RBE3 K4）为投影面法（Node：Surface projection/CP），然后单击"Close"按钮关闭对话框。

4．定义实常数

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，弹出实常数定义面板，单击 Add，选择单元 TARGE170，单击"OK"按钮，弹出 TARGE170 单元实常数定义面板，如图 20-6 所示，输入圆柱体的半径为 14，单击"OK"按钮；单击"Add"按钮，选择单元类型 3 CONTA173，单击"OK"按钮，保持默认设置，单击"OK"按钮；单击"Add"按钮，选择单元类型 4 CONTA173，单击"OK"按钮，保持默认设置，单击"OK"按钮，单击"Close"按钮。

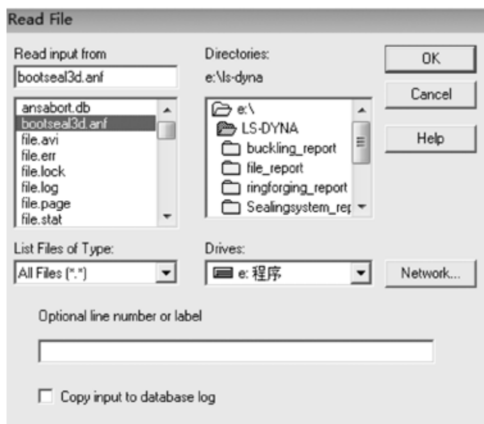


图 20-5　读入文件面板

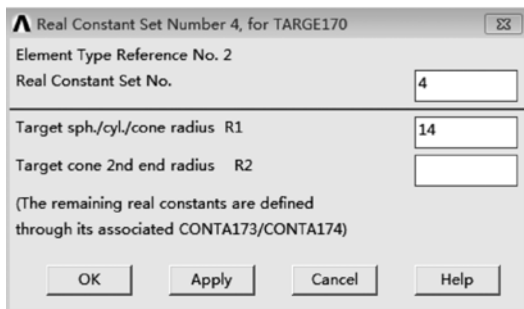


图 20-6　TARGE170 单元实常数定义面板

5．定义材料模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，弹出一个对话框，单击 Structural→Nonlinear→Elastic→Hyperelastic→Neo-Hookean，弹出 Neo-Hookean 超弹材料模型参数定义面板，如图 20-7 所示，输入 mu=1.5、d=0.026，单击"OK"按钮。

6．建立刚性圆轴模型

（1）定义节点

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，弹出在

当前坐标系中创建节点面板，输入节点号为 1，对应的节点坐标为 0，0，0，单击“Apply”按钮，继续输入节点号为 2，对应的节点坐标为 0，97，0，单击“OK”按钮。

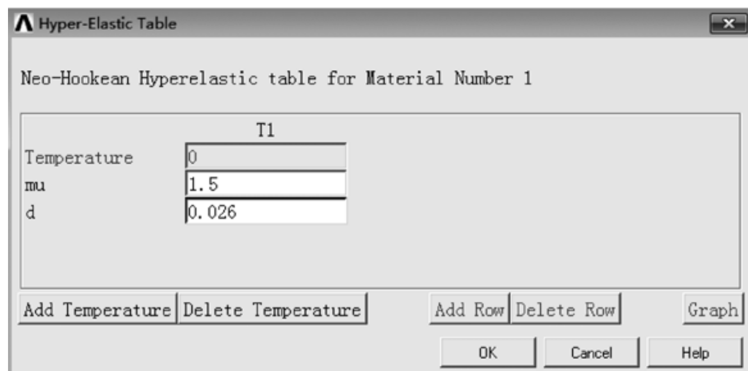


图 20-7　Neo-Hookean 超弹材料模型参数定义面板

（2）设置单元属性

GUI：单击 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 20-8 所示，设置单元类型为 2 号单元 TARGE170，实常数号为 1，目标单元形状为圆柱（Cylinder），单击“OK”按钮。

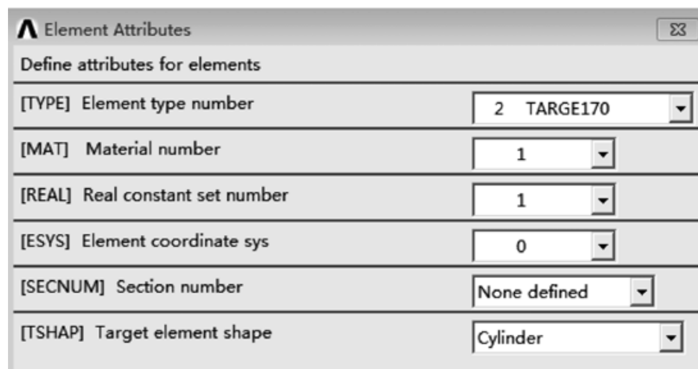


图 20-8　单元属性设置面板

（3）创建刚性目标单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，弹出拾取对话框，输入 1 和 2，单击“OK”按钮。

（4）设置单元属性

GUI：单击 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 20-8 所示，设置单元类型为 2 号单元 TARGE170，实常数号为 1，目标单元形状为控制节点（Pilot node），单击“OK”按钮。

（5）创建控制目标单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，弹出拾取对话框，输入 1，单击“OK”按钮。

7．划分橡胶罩模型

（1）打开网格划分工具

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

（2）定义网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按钮，弹出网格属性设置面板，如图 20-9 所示，按照图 20-9 所示进行设置，单击“OK”按钮。

（3）设置网格总体尺寸

选择网格划分工具面板中的尺寸控制子面板中的总体网格控制（Global）选项并单击设置（Set）按钮，如图 20-10 所示，弹出总体网格尺寸设置面板，如图 20-11 所示。

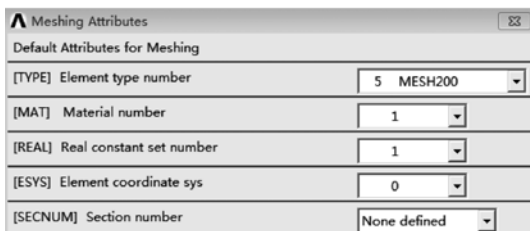


图 20-9 网格属性设置面板



图 20-10 网格划分工具面板中尺寸控制子面板

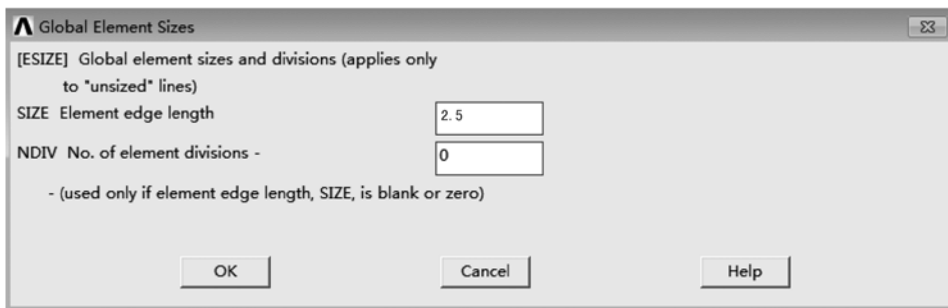


图 20-11 总体网格尺寸设置面板

该设置面板中有两个控制选项：单元尺寸（Element edge length）和单元数量（No. of element divisions），在单元尺寸中输入 2.5，单击“OK”按钮。

（4）网格划分设置

图 20-12 给出了网格划分设置面板，将划分对象设置为面（Areas），单元形状为四边形（Quad），网格划分方法为映射方法（Mapped）。

（5）划分橡胶罩的侧面

单击网格划分工具面板上的网格划分按钮（Mesh），弹出拾取对话框，拾取橡胶罩的侧面 A1、A2、A5 一直到 A17，单击“OK”按钮。

（6）定义网格属性

单击网格划分工具面板上的网格属性设置（Element Attributes）区域的设置（Set）按

钮，弹出网格属性设置面板，如图 20-9 所示，将单元类型修改为 SOLID185，单击“OK”按钮。

（7）扫描网格设置

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→Sweep Opts，弹出扫描选项设置面板，如图 20-13 所示，勾选在扫描后清除面单元（Clear area element after sweeping），单击“OK”按钮。

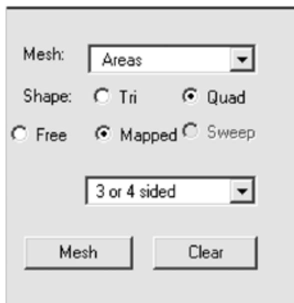


图 20-12 网格划分设置面板

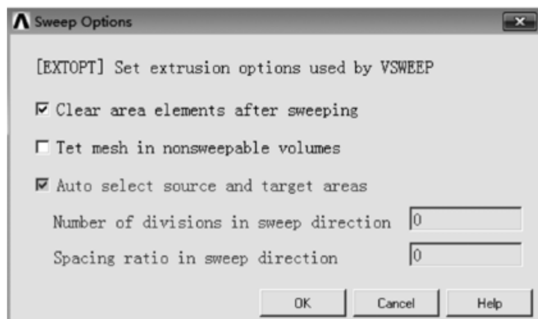


图 20-13 扫描选项设置面板

（8）网格划分设置

图 20-14 给出了网格划分设置面板，将划分对象设置为体（Volumes），单元形状为六面体（Hex），网格划分方法为扫描方法（Sweep）。

（9）划分橡胶罩体

单击图 20-14 中的“Sweep”按钮，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮。

8．建立刚性轴与橡胶罩之间的刚-柔接触

在第 6 步已经建立了刚性圆轴模型，该步主要建立在橡胶罩内表面建立接触单元，并通过与刚性轴共同使用一个实常数号来实现刚性轴与橡胶罩之间的刚-柔接触。

（1）设置单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 20-15 所示，设置单元类型为 3 号单元 CONTA173，实常数号为 1，单击“OK”按钮。



图 20-14 网格划分设置面板

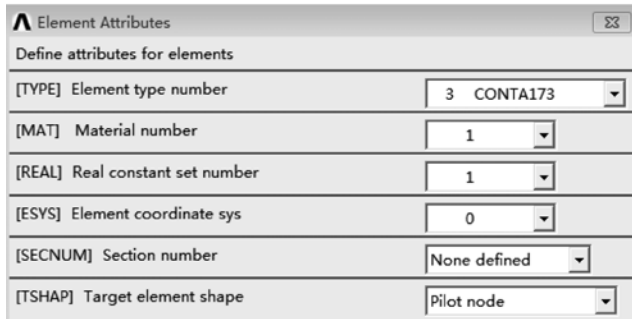


图 20-15 单元属性设置面板

（2）拾取橡胶罩的所有内表面

由于橡胶罩内表面较多，使用 GUI 拾取比较繁琐，因此输入以下命令流：

```
ASEL,S,AREA,,19,21,2
ASEL,A,AREA,,28
ASEL,A,AREA,,30,74,4
ASEL,A,AREA,,80,82,2
 ASEL,A,AREA,,89
ASEL,A,AREA,,91,135,4
```

（3）拾取依附于内表面的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择节点设置面板，如图 20-16 所示，按照图 20-16 所示进行设置，单击“OK”按钮。

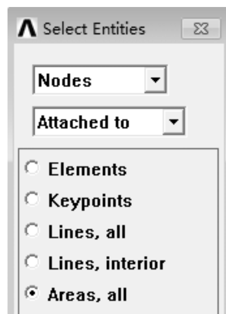


图 20-16　选择节点设置面板

（4）创建接触单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Surf to Surf，弹出划分自由表面面板，单击“OK”按钮。

9．建立橡胶罩内表面的自接触

（1）设置目标单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 20-15 所示，设置单元类型为 2 号单元 TARGE170，实常数号为 2，单击“OK”按钮。

（2）创建目标单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Surf to Surf，弹出划分自由表面面板，单击“OK”按钮。

（3）设置接触单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 20-15 所示，设置单元类型为 4 号单元 CONTA174，实常数号为 2，单击“OK”按钮。

（4）创建接触单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Surf to Surf，弹出划分自由表面面板，单击“OK”按钮。

10．建立橡胶罩外表面的自接触

（1）设置目标单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 20-15 所示，设置单元类型为 2 号单元 TARGE170，实常数号为 3，单击“OK”按钮。

（2）拾取橡胶罩的所有外表面

由于橡胶罩内表面较多，使用 GUI 拾取比较繁琐，因此输入以下命令流：

```
ASEL,S,AREA,,4
```

ASEL,A,AREA,,23,26,3
ASEL,A,AREA,,32,72,4
ASEL,A,AREA,,75,78,3
ASEL,A,AREA,,84,87,3
ASEL,A,AREA,,93,133,4
ASEL,A,AREA,,136

（3）拾取依附于外表面的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择节点设置面板，如图 20-16 所示，按照图 20-16 所示进行设置，单击“OK”按钮。

（4）创建接触单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Surf to Surf，弹出划分自由表面面板，单击“OK”按钮。

（5）设置接触单元属性

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes，弹出单元属性设置面板，如图 20-15 所示，设置单元类型为 4 号单元 CONTA174，实常数号为 3，单击“OK”按钮。

（6）创建接触单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf / Contact→Surf to Surf，弹出划分自由表面面板，单击“OK”按钮。

11．将橡胶罩的所有节点旋转到柱坐标系

（1）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

（2）排除节点 1 和 2

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择节点设置面板，如图 20-17 所示，按照图 20-17 所示进行设置，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，拾取节点 1 和 2，单击“OK”按钮。

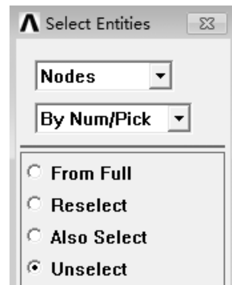


图 20-17　选择节点设置面板

（3）激活柱坐标系

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→ Global Cylindrical Y

（4）将橡胶罩上的所有节点旋转到当前激活的坐标系中

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→RotateNode→To Active CS

（5）选择所有实体

GUI：单击 Utility Menu→Select→Everything

20.6.2　求解

1．设置分析类型

（1）激活静力学分析

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，弹出分析类型设置面

板，如图 20-18 所示，选择静力学分析（Static），单击“OK”按钮。

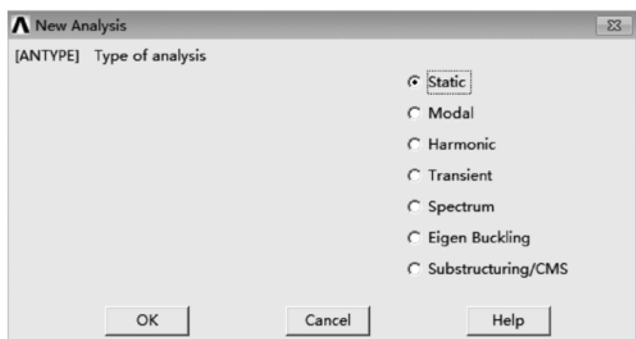


图 20-18 分析类型设置面板

（2）设置分析选项

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options，弹出静态分析选项设置面板，如图 20-19 所示，勾选大变形选项（Large deform effects），激活大变形分析，其他设置保存默认设置，单击“OK”按钮。

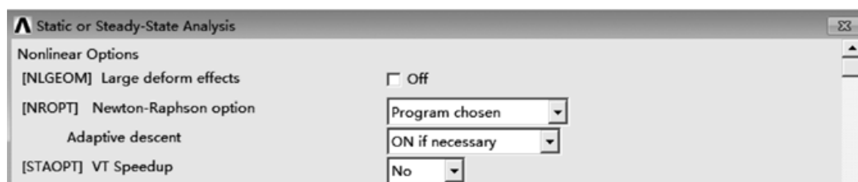


图 20-19 静态分析选项设置面板

2. 定义边界条件

（1）将激活坐标系旋转到总体笛卡儿坐标系

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cartesian

（2）选择橡胶罩对称面上的所有的面

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择面设置面板，如图 20-20 所示，按照图 20-20 进行设置，单击“OK”按钮。

（3）选择依附于对称面上的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择节点设置面板，如图 20-21 所示，按照图 20-21 进行设置，单击“OK”按钮。

（4）约束选择节点的 Y 方向的位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出的在节点处施加约束设置面板，设置约束类型为 UY，单击“OK”按钮。

（5）选择橡胶罩底面上的所有的面

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择面设置面板，如图 20-22 所示，按照图 20-22 进行设置，单击“OK”按钮。





图 20-20　选择面设置面板 1

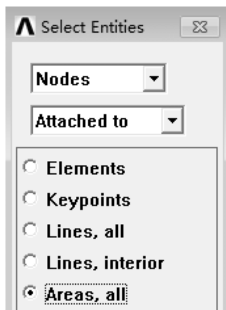


图 20-21　选择节点设置面板

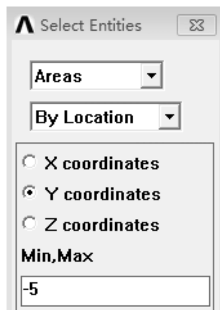


图 20-22　选择面设置面板 2

（6）选择依附于底面上的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择节点设置面板，如图 20-21 所示，按照图 20-21 进行设置，单击“OK”按钮。

（7）约束选择节点的 x 方向（径向）的位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出在节点处施加约束设置面板，设置约束类型为 UX，单击“OK”按钮。

（8）选择橡胶罩底端外表面

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择面设置面板，如图 20-23 所示，按照图 20-23 进行设置，单击“OK”按钮，弹出拾取对话框，拾取橡胶罩底端外表面的面 A23 和 A84，单击“OK”按钮。

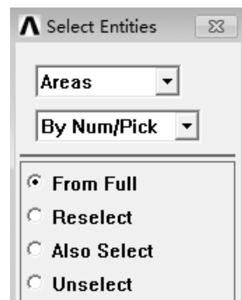


图 20-23　选择面设置面板

（9）选择依附于底面上的节点

GUI：单击 Utility Menu→Select→Entities，弹出选择节点设置面板，如图 20-21 所示，按照图 20-21 进行设置，单击“OK”按钮。

（10）约束选择节点的 z 方向（周向）的位移

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出的在节点处施加约束设置面板，设置约束类型为 UZ，单击“OK”按钮。

3．定义载荷步

（1）控制输出计算结果

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File，在弹出的计算结果输出控制面板中，选择 Every substep，单击“OK”按钮。

（2）激活优化非线性算法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Solution Ctrl，弹出非线性求解控制面板，如图 20-24 所示，激活求解控制（Solution Control），单击“OK”按钮，激活弹出对话框的基于接触状态的时间预测选项（Time prediction based on contact status），单击“OK”按钮。

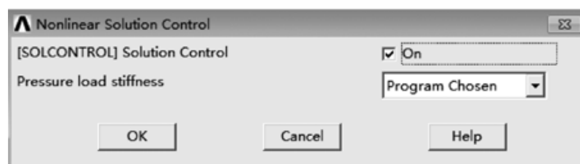


图 20-24　非线性求解控制面板

4．求解第一个载荷

（1）约束刚性轴的所有自由度

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取节点 1，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加约束设置面板，设置约束类型为 All DOF，单击“OK”按钮。

（2）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 20-25 所示，计算时间（TIME）输入 1，子步数量（Number of substeps）输入 5，最大子步数为 1000，最小子步数为 5，其他保持默认。单击“OK”按钮。

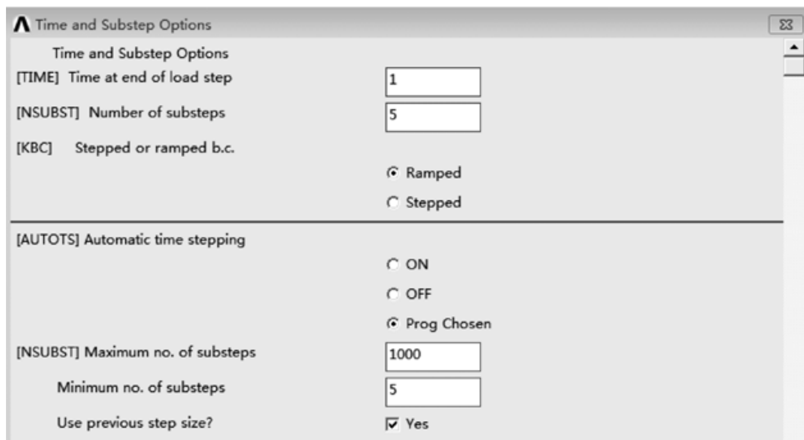


图 20-25　时间和子步选项设置面板

（3）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

5．求解第二个载荷

（1）将刚性轴控制节点向下移动 10mm

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取节点 1，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加约束设置面板，设置约束类型为 UY，并输入对应的数值为-10，单击“OK”按钮。

（2）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and

Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 20-25 所示，计算时间（TIME）输入 2，子步数量（Number of substeps）输入 10，最大子步数为 1000，最小子步数为 10，其他保持默认。单击“OK”按钮。

（3）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

6．求解第三个载荷

（1）将刚性轴控制节点转动 0.55rad

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，弹出拾取对话框，拾取节点 1，单击“OK”按钮，弹出在节点处施加约束设置面板，设置约束类型为 ROTZ，并输入对应的数值为 0.55，单击“OK”按钮。

（2）设置求解子步

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time and Substeps，弹出时间和子步选项设置面板，如图 20-25 所示，计算时间（TIME）输入 3，子步数量（Number of substeps）输入 20，最大子步数为 1000，最小子步数为 20，其他保持默认。单击“OK”按钮。

（3）求解

GUI：单击 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，在弹出的求解状态对话框中单击“OK”按钮，开始求解。

20.6.3 后处理

图 20-26 和图 20-27 给出了第一个载荷求解完成时的不同结果云图。由图 20-26 可知，过盈配合造成的橡胶罩的最大等效应力为 0.745MPa，由图 20-27 可知，过盈配合造成的橡胶罩的最大弹性应变能为 0.068。图 20-28 和图 20-29 给出了第二个载荷求解完成时的不同结果云图，由图 20-28 可知，第二个载荷求解完成后 y 方向的最大位移为 10.4013mm，由图 20-29 可知，第二个载荷求解完成后的最大等效应力为 0.761MPa。

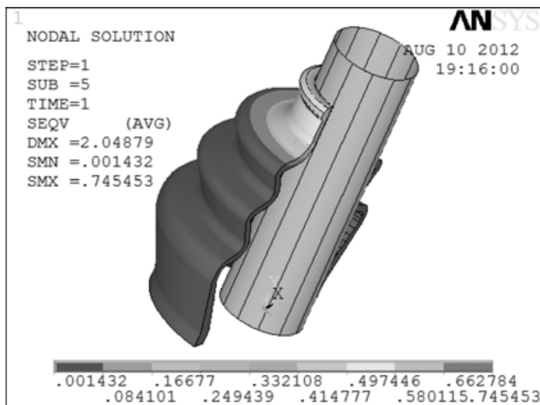


图 20-26　第一个载荷求解完成时的等效应力云图

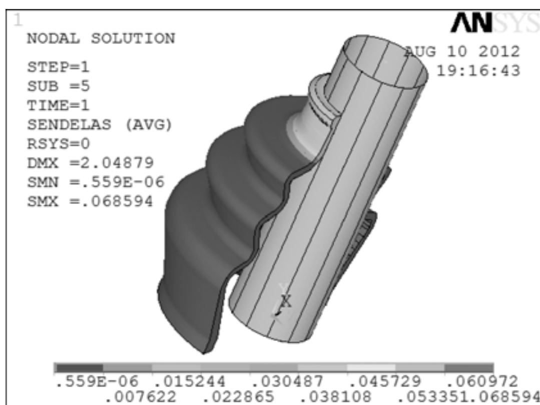


图 20-27　第一个载荷求解完成时的弹性应变能云图

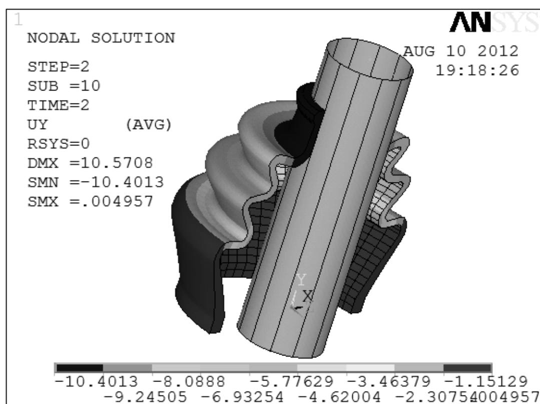


图 20-28　第二个载荷求解完成时的 UY 位移云图

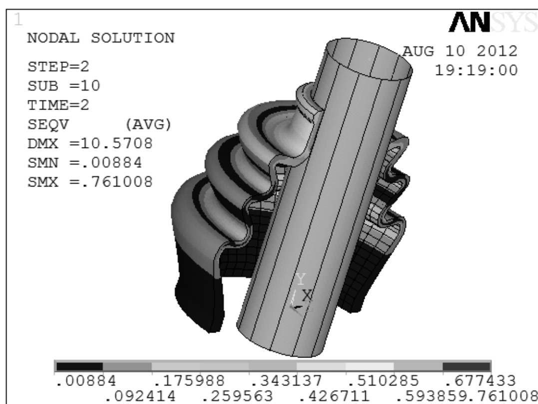


图 20-29　第二个载荷求解完成时的等效应力云图

图 20-30 和图 20-31 给出了第三个载荷求解完成时的不同结果云图，由图 20-30 可知，第三个载荷求解完成后最大等效应力为 1.09314MPa，由图 20-31 可知，第三个载荷求解完成后的最大接触压力为 0.2439MPa。

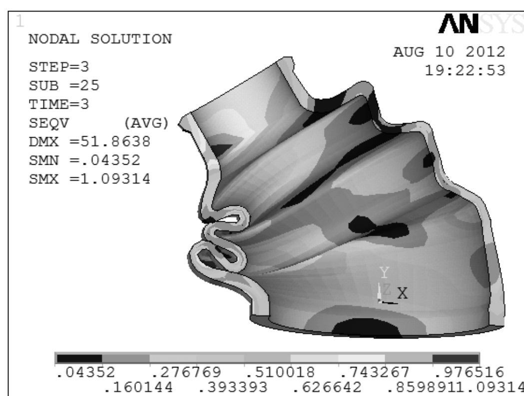


图 20-30　第三个载荷求解完成时的等效应力

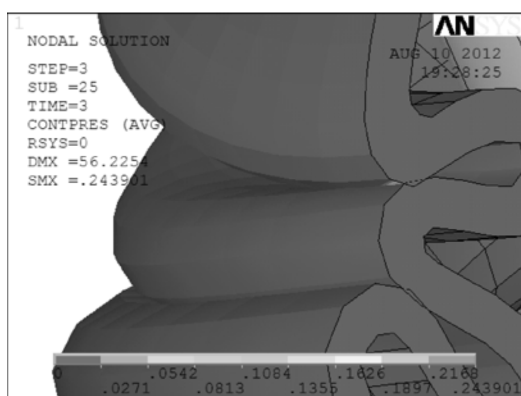


图 20-31　第三个载荷求解完成时的接触压力云图

20.7　命令流

```
/FILNAME,FEA OF RUBBER COVERG,0
!导入橡胶罩的三维模型
/INP,BOOTSEAL3D,ANF
/PREP7
ET,1,SOLID185                !三维实体单元用来模拟橡胶罩
ET,2,TARGE170                !目标单元
ET,3,CONTA173                !用来模拟刚-柔接触对的接触单元
ET,4,CONTA173                !用来定义橡胶罩的自接触
ET,5,MESH200,6               !仅用来划分网格
KEYOPT,3,9,2                 !使用斜坡加载考虑接触间隙影响
KEYOPT,3,4,0                 !使用高斯点检查接触状态
```

```
KEYOPT,4,4,3                  !定义表面投缘接触
R,1,14, ,                     !刚性圆柱轴的半径 = 14mm
R,2
R,3
!橡胶罩的材料参数
TB,HYPER,1,1,1,NEO
TBTEMP,0
TBDATA,1,1.5,0.026            ! NEO-HOOKEAN 模型参数
MP,MU,1,0.2
/COM ==============================================================
/COM   建立刚性圆柱模型
/COM ==============================================================
N,1,0,0,0                     !刚性轴中心线底面节点
N,2,0,97,0                    !刚性轴中心线顶面节点
TYPE,2
REAL,1
TSHAP,CYLINDER
E,1,2
TSHAP,PILOT
E,1
/COM ==============================================================
/COM   划分橡胶罩
/COM ==============================================================
! AREA MESH
TYPE,   5
MAT,    1
REAL,   1
ESIZE,2.5
MSHAPE,0                      !使用四边形单元划分网格
MSHKEY,1
AMESH,1
AMESH,2
AMESH,5,17
! 划分一侧体网格
TYPE,   1               !为未划分网格的体分配材料号、实常数号、单元类型号等单元属性
EXTOPT,ACLEAR,1
VSWEEP,ALL
/COM ==============================================================
/COM   定义接触对
/COM ==============================================================
! 定义刚-柔接触
TYPE,3
REAL,1
ASEL,S,AREA,,19,21,2
ASEL,A,AREA,,28
ASEL,A,AREA,,30,74,4
ASEL,A,AREA,,80,82,2
```



```
ASEL,A,AREA,,89
ASEL,A,AREA,,91,135,4
NSLA,S,1
ESURF
！ 定义橡胶罩的内表面自接触
TYPE,2
REAL,2
ESURF
TYPE,4
ESURF
！ 定义橡胶罩的外表面自接触
TYPE,2
REAL,3
ASEL,S,AREA,,4
ASEL,A,AREA,,23,26,3
ASEL,A,AREA,,32,72,4
ASEL,A,AREA,,75,78,3
ASEL,A,AREA,,84,87,3
ASEL,A,AREA,,93,133,4
ASEL,A,AREA,,136
NSLA,S,1
ESURF
TYPE,4
ESURF
!将橡胶罩的所有节点转到柱坐标系中
ALLSEL,ALL
NSEL,U,NODE,,1
NSEL,U,NODE,,2
CSYS,5
NROTAT,ALL
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOLU
ANTYPE,STATIC
NLGEOM,ON
CSYS,0
ASEL,S,LOC,Z,0
NSLA,S,1
D,ALL,UY
ASEL,S,LOC,Y, -5
NSLA,S,1
D,ALL,UZ
ASEL,S,AREA,,23
ASEL,A,AREA,,84
NSLA,S,1
D,ALL,UX
ALLSEL,ALL
```




```
OUTRES,ALL,ALL,
SOLCONTROL,ON
！载荷步 1－ 初始穿透
NSUBST,5,1000,5
D,1,ALL
SOLVE
！载荷步 2－ 向下移动刚性轴
NSUBST,10,1000,10
D,1,UY,－10
SOLVE
！载荷步 3－ 转动刚性轴
NSUBST,20,1000,20
D,1,ROTZ,0.55
SOLVE
FINISH
```

第 21 章　ANSYS 常见问题解答



21.1　ANSYS 的单位制

ANSYS 作为通用有限元分析软件没有规定所使用的具体物理量的单位，不同的单位之间只要保证协调就可以。为了避免使用单位发生错误，建议用户使用下列命令：

```
/UNITS, Label
```

其中，Label 是 ANSYS 计算时使用的单位系统标识，它包括以下 6 种选项。

（1）USER：使用用户自定义的单元系统，这也是 ANSYS 的默认选项。

（2）SI：使用国际单位，即使用基本量纲，长度的单位是米（m），质量的单位是千克（kg），时间的单位是秒（s），温度的单位为开尔文（K）。

（3）MKS：使用 MKS 单位系统，其中长度单位是米（m），质量的单位是千克（kg），时间的单位是秒（s），温度的单位为摄氏度（℃）。

（4）uMKS：使用 μMKS 单位系统，其中长度单位是微米（μm），质量的单位是千克（kg），时间的单位是秒（s），温度的单位为摄氏度（℃）。

（5）CGS：使用 CGS 单位系统，其中长度单位是厘米（cm），质量的单位是克（g），时间的单位是秒（s），温度的单位为摄氏度（℃）。

（6）MPA：使用 MPA 系统，其中长度单位是毫米（mm），质量的单位是毫克（mg），时间的单位是秒（s），温度的单位为摄氏度（℃）。

这个命令只给出了基本的单位量，表 21-1 给出其他常用物理量的导出单位。

表 21-1　MKS 单位与μMKSv 单位的转换关系表

参　数	MKS 单位	量　纲	转换系数	μMKS	量　纲
长度	m	m	1E6	μm	μm
时间	s	s	1	s	s
质量	kg	kg	1	kg	kg
力	N	$(kg \cdot m)/s^2$	1E6	uN	$(kg \cdot \mu m)/s^2$
压力	Pa	$kg/(m \cdot s^2)$	1E−6	MPa	$kg/(\mu m \cdot s)^2$
速度	m/s	m/s	1E6	μm/s	μm/s
加速度	m/s^2	m/s^2	1E6	$\mu m/s^2$	$\mu m/s^2$
功率	W	$(kg \cdot m)^2/s^3$	1E12	pW	$(kg \cdot \mu m/)^2/s^3$
导热系数	W/(m·℃)	$(kg \cdot m)/(℃ \cdot s^3)$	1E6	pW/(μm·℃)	$(kg \cdot \mu m)/(℃ \cdot s^3)$
热通量	W/m^2	kg/s^3	1	$pW/\mu m^2$	kg/s^3
比热容	J/(kg·℃)	$m^2/(℃ \cdot s^2)$	1E12	pJ/(kg·℃)	$(\mu m)^2/(℃ \cdot s^2)$

（续）

参　　数	MKS 单位	量　　纲	转换系数	μMKS	量　　纲
热流量	W	$(kg\cdot m)^2/s^3$	1E12	pW	$(kg\cdot \mu m^2)/s^3$
生热率	W/m^3	$kg/(m\cdot s^3)$	1E−6	$pW/\mu m^3$	$kg/(\mu m\cdot s^3)$
对流系数	$W/(m^2\cdot ℃)$	$kg/(s^3\cdot ℃)$	1	$pW/(\mu m^2\cdot ℃)$	$kg/(s^3\cdot ℃)$

表 21-1 给出了 MKS 单位与μMKSv 单位的转换关系，由该表可知，当已知 MKS 单位时，用户只需乘以转换系数即可将单位转换为μMKS，如果用户想将 MKS 单位转换为 CGS，则只需将 MKS 单位量纲中的 m 和 kg 分别转换为 100cm 和 1000g，然后进行简单运算即可。下面举一个实例：将 MKS 单位中力的单位 N 转换为 CGS 对应单位，首先将 N 的量纲$(kg\cdot m)/s^2$中的 m 转换为 100cm，kg 转换为 1000g，则转换系数为 $100\times1000=1\times10^5$，因此，CGS 单位系统中的力的单位为 1×10^5 倍的 MKS 单位中的力。

21.2　前处理中的常见问题

21.2.1　坐标系问题

1．坐标系简介

ANSYS 程序提供了多种坐标系供用户选取。

- 总体和局部坐标系：用来定位几何形状参数如节点、关键点等的空间位置。
- 显示坐标系：用于几何形状参数的列表和显示。
- 节点坐标系：定义每个节点的自由度方向和节点结果数据的方向。
- 单元坐标系：确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。
- 结果坐标系：在通用后处理操作中将计算结果转换到一个特定的坐标系中。

2．总体坐标系

总体坐标系被认为是一个绝对的参考系。ANSYS 程序提供了前面定义的三种总体坐标系：笛卡儿坐标系、柱坐标系和球坐标系，如表 21-2 所示。

表 21-2　总体坐标系

总体坐标系类型	笛卡儿坐标系	柱坐标系	球坐标系	柱坐标系
总体坐标系简图	Y, X, Z, Y, O, X, Z	Y, R, Z, θ, O, X, Z	Y, R, φ, θ, O, X, Z	Y, Y, R, X, O, θ, Z
体坐标系编号	0 (C.S.0)	1 (C.S.1)	2 (C.S2)	5 (C.S.5)
激活命令	CSYS,0	CSYS,1	CSYS,2	CSYS,5

注意：所有这三种系统都是右手系，有共同的原点。它们由其坐标系号来识别：0 代表

笛卡儿坐标系，1代表柱坐标系，2代表球坐标系，5代表柱坐标系。笛卡儿坐标系的坐标分量为x，y和z；柱坐标系（1）的坐标分量为R,θ和z；球坐标系的坐标分量为R,θ和φ；柱坐标系（5）的坐标分量为R,θ和y。



3．局部坐标系

有时需要建立自己的坐标系，如在断裂力学求解应力强度因子的时候。局部坐标系原点与总体坐标系的原点偏移一定的距离或旋转一定角度。用户可定义局部坐标系，按以下方式创建。

（1）使用总体笛卡儿坐标定义局部坐标系

命令：LOCAL

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc

（2）通过已有节点定义局部坐标系

命令：CS

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→By 3 Nodes

（3）通过已有关键点定义局部坐标系

命令：CSKP

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→CreateLocal CS→By 3 Keypoints

（4）当前定义的工作平面的原点为中心定义局部坐标系

命令：CSWPLA

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At WP Origin

当用户定义了一个局部坐标系后，它就会被激活。创建了局部坐标系后，程序会分配给它一个坐标系号（必须不小于 11），可以在 ANSYS 进程中的任何阶段建立（或删除）局部坐标系。

（5）删除一个局部坐标

命令：CSDELE

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Delete Local CS

（6）查看所有的总体和局部坐标系

命令：CSLIST

GUI：单击 Utility Menu→List→Other→Local Coord Sys

与三个预定义的总体坐标系类似，局部坐标系可以是笛卡儿坐标系、柱坐标系或球坐标系，但是局部坐标系的编号要不小于 11。

注意：一般建议不要在球坐标系下进行实体建模操作，因为生成的结果可能不是用户想要的面或体。

4．显示坐标系

因为显示坐标系默认为总体笛卡儿坐标系，所以即便是在其他坐标系中定义的节点和关

键点，其列表都在总体笛卡儿坐标中显示。用户可用下列方法改变当前的显示坐标系。

命令：DSYS , KCN

说明：KCN 为坐标系参考号，0 为笛卡儿坐标系，1 为柱坐标系，2,为球坐标系，也可以为之前定义过的坐标系编号。

GUI：单击 Utility Menu→WorkPlane→Change Display CS to→Global Cartesian/Global Cylindrica/ Global Spherica/ Specified Coord Sys

改变显示坐标系也会影响图形显示。除非用户有特殊的需要，一般在用诸如 NPLOT，EPLOT 命令显示图形前，应将显示坐标系重置为总体笛卡儿坐标系。DSYS 命令对 LPLOT，APLOT 和 VPLOT 命令无影响。

5. 节点坐标系

总体和局部坐标系用于几何体的定位，而节点坐标系则用于定义节点自由度的方向。每个节点都有自己的节点坐标系，默认情况下，节点坐标系平行于总体笛卡儿坐标系。可用下列方法将任意节点坐标系旋转到指定方向。

（1）将节点坐标系旋转到激活坐标系的方向

命令：NROTAT

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Create→Nodes→Rotate Node CS→To Active CS

（2）对已有节点指定旋转角度

命令：NMODIF

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Create→Nodes→Rotate Node CS→By Angles

（3）按方向余弦旋转节点坐标系

命令：NANG

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Create→Nodes→Rotate Node CS→By Vectors

（4）列出节点坐标系相对总体笛卡儿坐标旋转的角度

命令：NLIST

GUI：单击 Utility Menu→List→Nodes

6. 单元坐标系

每个单元都有自己的坐标系，单元坐标系用于规定正交材料的方向、加面压力和结果的输出方向。所有的单元坐标系都是正交右手系。

大多数单元坐标系的默认方向遵循以下规则。

- 线单元的 x 轴通常从该单元的 I 节点指向 J 节点
- 壳单元的 x 轴通常也取 I 节点到 J 节点的方向。z 轴过 I 点且与壳面垂直，其正方向由单元的 I、J 和 K 节点按右手定则确定，y 轴垂直于 x 轴和 z 轴。
- 对二维和三维实体单元的单元坐标系总是平行于总体笛卡儿坐标系。

然而，并非所有的单元坐标系都符合上述规则。许多单元类型都有单元关键字选项，通过设置这些选项就可以修改单元坐标系的默认方向，对面单元和体单元而言，将单元坐标系的方向调整到已定义的局部坐标系上。

命令：ESYS

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Attributes→Define→Default Attribs

如果既用单元关键字 KEYOPT 命令又用了单元坐标系 ESYS 命令，则单元关键字 KEYOPT 命令的定义有效。对某些单元而言，通过输入角度可相对先前的方向进一步旋转。

7. 结果坐标系

在求解的过程中，计算的结果数据包括位移、梯度、应力、应变等。这些数据存储在数据库和结果文件中，要么是在节点坐标系，要么是单元坐标系。但是，结果数据通常是在激活的结果坐标系中显示列表和单元表数据存储的操作。

用户可将活动的结果坐标系转到另一个坐标系如总体柱坐标系或一个局部坐标系，或转到在求解时所用的坐标系下，例如节点和单元坐标系。如果使用用户列表、显示或操作这些结果数据，则它们将首先被旋转到结果坐标系下，如图 21-1 所示。利用下列方法即可改变结果坐标系。



图 21-1 输出选项

命令：RSYS

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Options for Output

8. 坐标系的激活

用户可定义任意多个坐标系，但某一时刻只能有一个坐标系被激活。激活坐标系的方法如下：首先自动激活总体笛卡儿坐标系。每当用户定义一个新的局部坐标系，这个新的坐标系就会自动被激活。如果要激活一个总体坐标系或以前定义的坐标系，可用下列方法。

命令：CSYS

GUI：单击 Utility Menu→Change Active CS to→Global Cartesian

在 ANSYS 程序运行的任何阶段都可以激活某个坐标系。若没有明确地改变激活的坐标系，当前激活的坐标系将一直保持有效。

注意：在定义节点或关键点时，无论哪个坐标系是激活的，程序都将坐标标为 x、y 和 z，但是如果激活的不是笛卡儿坐标系，用户应将 x、y 和 z 理解为柱坐标中的 R、θ 和 z 或球坐标系中的 R、θ 和 ϕ。

21.2.2 函数加载问题

1．函数加载器简介

（1）区域介绍

1）函数类型区

用户可以在图 21-2 所示的函数编辑器面板中的函数类型区中定义单变量函数（Single equation）和基于状态变量的分段函数（Multivalued function based on regime variable）。



图 21-2　函数编辑器面板

2）函数表达式区

在该区域用户可以输入需要定义的函数表达式。

3）变量列表区

下拉变量列表区选择一个基本变量。可选的基本变量如下。

Time：时间

X：全局笛卡儿坐标系中 x 的位置

Y：全局笛卡儿坐标系中 y 的位置

Z：全局笛卡儿坐标系中 z 的位置

TEMP：温度

VELOCITY：速度自由度或单元中计算流速的大小

PRES：施加的表面压力

TSURF：SURF151 或 SURF152 单元的单元表面温度

DENS：密度

Kxx：热传导率

Kyy：热传导率

Kzz：热传导率

Visc：粘性

Emmissivity：熵

Xr：基准位置（Xr）（仅用 ALE 公式表达）

Yr：基准位置（Yr）（仅用 ALE 公式表达）

Zr：基准位置（Zr）（仅用 ALE 公式表达）

GAP：接触间隙

OMEGS：转速（OMEGS）（SURF151 或 SURF152 单元的转速）

OMEGF：转速（FLUID116 单元的转速）

SLIP：滑动系数（FLUID116 单元的滑动系数）

4）数学函数区

该区域包括了常用的数学函数，用户可以直接单击使用。

2．函数加载方法

下面通过一个实例给用户具体讲解函数加载的方法，如图 21-3 给出了函数加载实例示意图，模型的几何尺寸如下，长度为 1m，高度为 0.2m，在模型的上表面作用于与空间坐标 x 相关的压力，假设压力的函数为 $p = x^2 + x + 1$。

（1）定义单元

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，弹出对话框，单击“Add”按钮，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 4 node 182 单元，单击“OK”按钮。

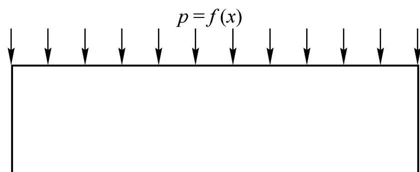


图 21-3　函数加载实例示意图

（2）建立模型

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，弹出通过尺寸创建矩形面板，如图 21-4 所示，按照图 21-4 进行输入，然后单击“OK”按钮。

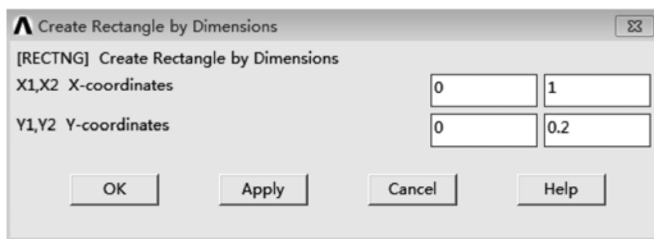


图 21-4　通过尺寸创建矩形面板

（3）划分网格

输入以下命令流：

```
ESIZE,0.01
```

```
AMESH,1
```

（4）定义函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Apply→Functions→Define/Edit，弹出函数编辑器面板，如图 21-5 所示，输入函数表达式为 $\{X\}^2+\{X\}+1$，单击 File→Save，弹出保存文件对话框，输入文件名为 PX，单击“保存”按钮。

（5）读入函数

GUI：单击 Main Menu→Solution→Apply→Functions→Read File，读入文件 PX，单击“打开”按钮，弹出函数加载器面板，如图 21-6 所示，输入表格参数名为 px。

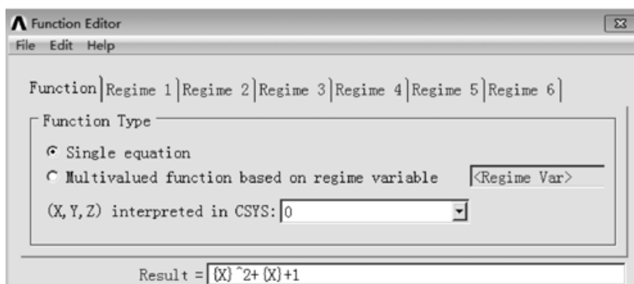


图 21-5　函数编辑器面板

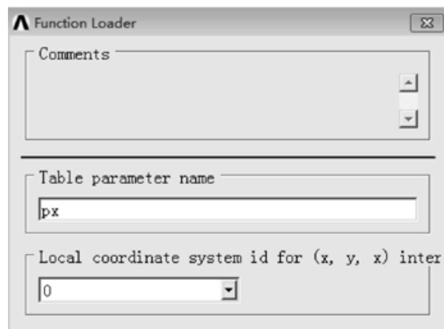


图 21-6　函数加载器面板

（6）选择顶面节点

输入以下命令：

```
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0.2
NPLOT
```

（7）在顶面上施加压力

GUI：单击 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Nodes，弹出拾取对话框，单击“Pick All”按钮，弹出在节点处施加压力面板，如图 21-7 所示，选择施加载荷方法为表格（Existing table），单击“OK”按钮，在弹出的面板中选择表格 PX，单击“OK”按钮。

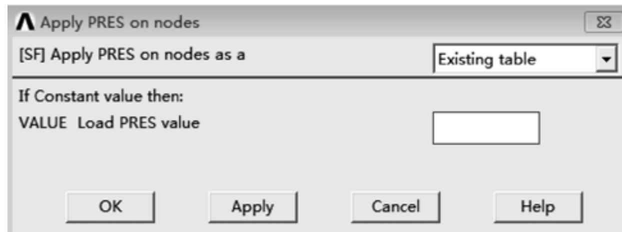


图 21-7　在节点处施加压力面板

（8）查看施加的节点压力

GUI：单击 Utility Menu→List→Loads→Surface→On All Nodes，弹出节点压力列表，如

图 21-8 所示。图 21-9 给出了模型顶面上的有限元模型，由图 21-8 可知 122 的 x 的坐标为 0，则压力为 1，符合图 21-9 给出的结果，证明施加载荷方法正确。

ELEMENT	LKEY	FACE NODES	REAL	IMAGINARY
1901	3	122	1.00000000	0.00000000
		221	1.01010000	0.00000000
1902	3	221	1.01010000	0.00000000
		220	1.02040000	0.00000000
1903	3	220	1.02040000	0.00000000
		219	1.03090000	0.00000000
1904	3	219	1.03090000	0.00000000
		218	1.04160000	0.00000000
1905	3	218	1.04160000	0.00000000
		217	1.05250000	0.00000000

图 21-8　节点压力列表



图 21-9　有限元模型

21.2.3 约束方程

1. 约束方程的定义

线性约束方程提供了一种比简单耦合更通用的联系自由度值的方法。约束方程必须有如下形式：

$$\text{Constant} = \sum_{i=1}^{N}(Coefficient(i) * U(i)) \quad (21\text{-}1)$$

式中，$U(i)$ 是自由度项 (i)，N 是方程中项的编号。

2. 定义约束方程

（1）直接方法

可用下列方法直接生成约束方程。

命令：CE

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Constraint Eqn，弹出定义约束方程的面板，如图 21-10 所示。

该面板包括 11 个控制选项，分别是约束方程参考号（NEQN），方程常数（CONST），约束方程表达式中第一项中的节点号（NODE1），约束方程表达式中第一项中的约束自由度（Lab1），约束方程表达式中第一项中的常数（C1），约束方程表达式中第二项中的节点号（NODE2），约束方程表达式中第二项中的约束自由度（Lab2），约束方程表达式中第二项中的常数（C2），约束方程表达式中第三项中的节点号（NODE3），约束方程表达式中第三项中的约束自由度（Lab3），约束方程表达式中第三项中的常数（C3）。

图 21-11 是一个典型的约束方程应用的例子，力矩的传递是由梁单元与平面单元的连接来完成的。

在此例中，如果不用约束方程则节点 2 表现为一个铰链。可用下列方法传递梁和平面应

力单元之间的力矩：

$$ROTZ2=(UY3-UY1)/10$$

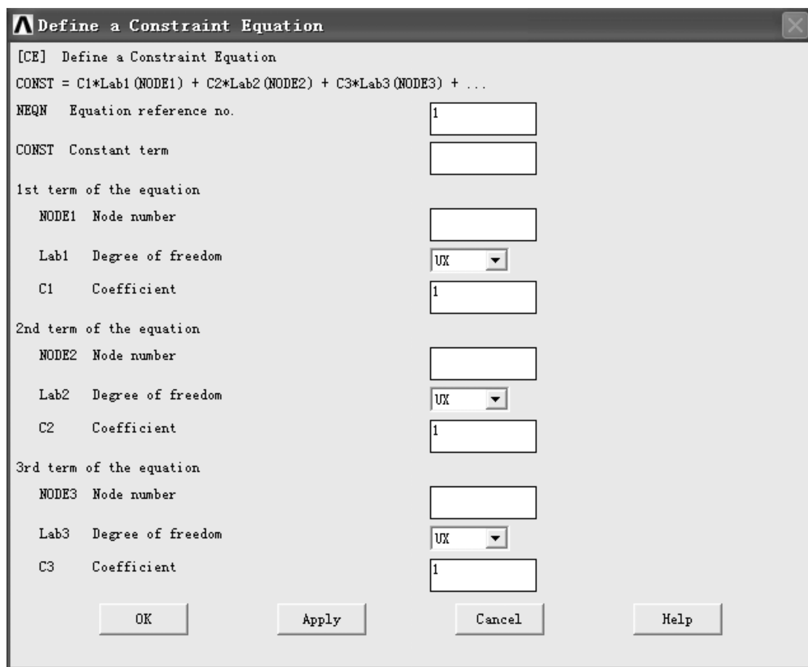


图 21-10　定义约束方程的面板

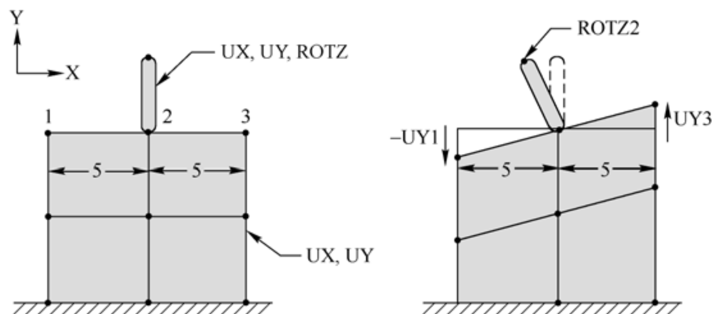


图 21-11　建立旋转和平移自由度的关系

此方程应当重写成要求的格式，并代入程序：

0 = UY3−UY1−10*ROTZ2
CE,1,0,3,UY,1,1,UY, −1,2,ROTZ, −10

方程中第一个独特的自由度按方程中所有其他自由度的方式删除。一个独特的自由度是不在任何其他约束方程、耦合节点集、给定位移集或主自由度集中定义的自由度。应将方程的第一项作为自由度删除。尽管在理论上可在多于一个方程中指定相同的自由度，但用户必须小心避免重定义，还必须保证模型中每个节点和自由度的存在。

21.2.4 载荷步、子步和平衡迭代

载荷步是为了成功求解模型的一种必要设置。在线性静态分析中，可以使用不同的载荷步施加不同的载荷组合如在第一个载荷步中施加风载荷，在第二个载荷步中施加重力载荷，在第三个载荷步中施加风和重力载荷以及一个不同的支承条件等等。在瞬态分析中，多个载荷步加到载荷-时间曲线的不同区段。

ANSYS 程序将把在第一个载荷步选择的单元组用于随后的所有载荷步，而不论用户为随后的载荷步指定哪个单元组。要选择一个单元组，可使用下列两种方法之一。

命令：ESEL

GUI：Utility Menu→Select→Entities

图 21-12 为三个载荷步的载荷-时间曲线：第一个载荷步是线性斜坡载荷，第二个载荷步是恒定载荷，第三个载荷步是突然卸载载荷。

子步是执行求解载荷步中的点。使用子步，有如下原因。

（1）在非线性静态或稳态分析中，使用子步逐渐施加载荷以便能获得精确解。

（2）在线性或非线性瞬态分析中，使用子步满足瞬态时间累积法则。

（3）在谐响应分析中，使用子步获得谐波频率范围内多个频率处的解。

平衡迭代是在给定子步下为了收敛而计算的附加解，对于非线性求解的收敛起着重要作用。

例如，在二维材料非线性分析中，为获得精确解，通常使用两个载荷步（图 21-13）。

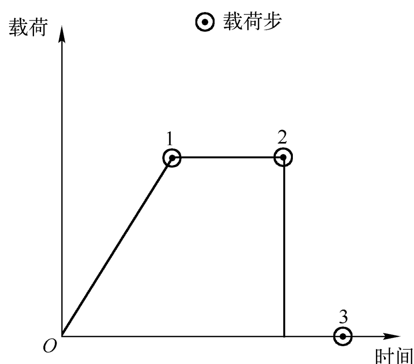


图 21-12　三个载荷步的载荷-时间曲线

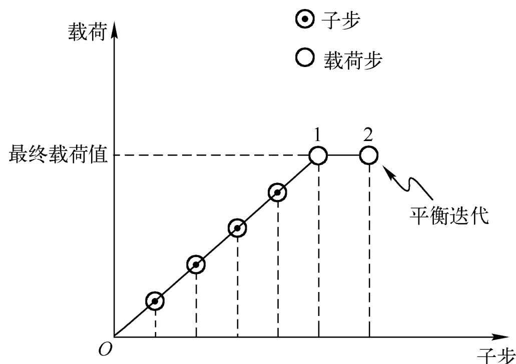


图 21-13　载荷步、子步和平衡迭代

第一个载荷步，将载荷逐渐加到 5～10 个子步以上，每个子步仅用一次平衡迭代。

第二个载荷步，得到最终收敛解，且仅有一个使用 15～25 次平衡迭代的子步。

21.2.5 斜坡载荷与阶跃载荷

当在一个载荷步中指定一个以上的子步时，就出现了载荷是阶跃载荷还是斜坡载荷的问题。

（1）如果载荷是阶跃的，那么全部载荷施加于第一个载荷子步，且在载荷步的其余部分，载荷保持不变，如图 21-14a 所示。

（2）如果载荷是斜坡逐渐递增大的，那么在每个载荷子步，载荷值逐渐增加，且全部载

荷出现在载荷步结束时，如图 21-14b 所示。

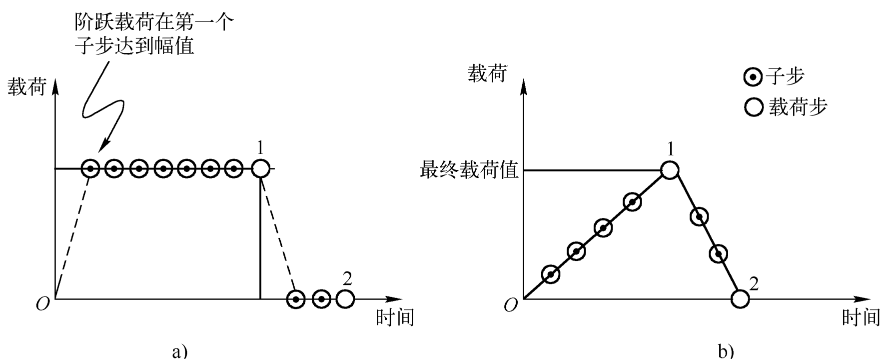


图 21-14　阶跃载荷与斜坡载荷

a) 阶跃载荷　b) 斜坡载荷

命令：KBC 用于表示载荷为斜坡载荷还是阶跃载荷。KBC，0 表示载荷为斜坡载荷；KBC，1 表示载荷为阶跃载荷。

21.3　材料非线性分析中的常见问题

21.3.1　激活材料非线性的方法

图 21-15 给出了材料模型定义面板，用户通过该面板可以定义各种材料模型，包括结构力学的应力-应变模型（Structural），定义热分析的材料参数（Thermal），定义计算流体动力学的材料参数（CFD）等。

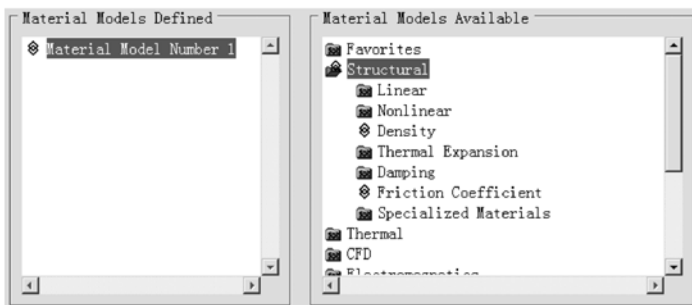


图 21-15　材料模型定义面板

用户只需定义相应的材料模型，并在网格划分前选用该材料模型，在计算中将该材料模型赋予相应的物理模型。下面介绍考虑弹塑性材料模型的计算。

（1）定义材料的弹性模量和泊松比

（2）定义屈服应力和切线模量

在定义材料模型面板中单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，弹出双线性等向

强化模型设置面板，如图 21-16 所示。在面板中 Yield Stss 对话框中输入材料的屈服应力，Tang Mod 对话框中输入材料的切变模量。

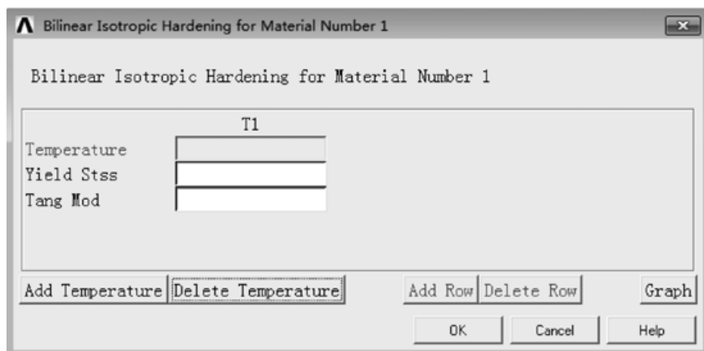


图 21-16 双线性等向强化模型设置面板

21.3.2 材料模型分类简介

在本节给用户介绍 ANSYS 进行结构分析时所用到的材料模型。结构分析的材料模型主要包括线弹性材料模型和非线性材料模型。

1．线性材料模型

（1）各向同性线弹性材料模型

定义路径如下：

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic

（2）正交各向异性线弹性材料模型

定义路径如下：

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Orthotropic

（3）各向异性线弹性材料模型

定义路径如下：

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Anisotropic

2．非线性弹性材料模型

（1）超弹材料模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Hyperelastic，弹出超弹材料模型列表，如图 21-17 所示。ANSYS 提供了 9 种超弹材料材料模型和超弹材料曲线拟合功能。这 9 种超弹材料模型分别是 Mooney-Rivlin 模型，Ogden 模型，Neo-Hookean 模型，Polynomial Form 模型，Arruda-Boyce 模型，Gent 模型，Yeoh 模型，Blatz-Ko 模型，Ogden 模型。

（2）多线性弹性模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Multilinear Elastic，弹出多线性弹性材料模型定义面板，如图 21-19 所示，在面板中可以输入多个应变（STRAIN）-应力（STRRESS）数据点。

- Curve Fitting
- Mooney-Rivlin
- Ogden
- Neo-Hookean
- Polynomial Form
- Arruda-Boyce
- Gent
- Yeoh
- Blatz-Ko (Foam)
- Ogden (Foam)
- Mooney-Rivlin (TB,MOON)

图 21-17　超弹材料模型列表

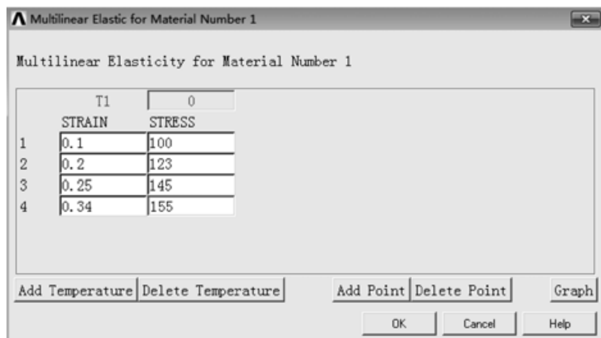


图 21-18　多线性弹性材料模型定义面板

3. 率无关材料模型

假设材料发生塑性应变是瞬时的，该类材料模型与时间变化没有关系。它主要包括以下四类材料模型。

（1）等向强化塑性模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardending Plasticity。ANSYS 提供了 Mises Plasticity 和 Hill Plasticity 弹塑性模型。每一种弹塑性模型包括双线性（Bilinear），多线性（Multilinear）和非线性（Nonlinear）模型。

（2）通用各向异性 Hill 塑性模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Generalized Anisotropic Hill Potential

（3）随动强化塑性模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity。ANSYS 提供了 Mises Plasticity 和 Hill Plasticity 弹塑性模型。每一种弹塑性模型包括双线性（Bilinear），多线性（Multilinear）和非线性（Nonlinear）模型。

（4）混合强化塑性模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Combined Kinematic and Isotropic Hardening Plasticity。ANSYS 提供了 Mises Plasticity 和 Hill Plasticity 弹塑性模型。每一种弹塑性模型包括联合使用 Chaboche 和双线性等向强化模型（Chaboche and Multilinear Isotropic），联合使用 Chaboche 和多线性等向强化模型（Chaboche and Multilinear Isotropic），联合使用 Chaboche 和非线性等向强化模型（Chaboche and Nonlinear Isotropic）。

4. 率相关材料模型

（1）粘塑性模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Dependent→Visco-Plasticity。ANSYS 提供了等向强化塑性模型，并且包括 Mises Plasticity 和 Hill Plasticity 两种塑性模型。每一种弹塑性模型包括双线性（Bilinear），多线性（Multilinear）和非线性（Nonlinear）模型。

（2）蠕变模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Dependent→Creep。ANSYS 提供了曲线拟合（Curve Fitting）、仅考虑蠕变（Creep only）、带等向塑性强化模型的蠕变模型（With Isotropic Hardning Plasticity）、带随动塑性强化模型的蠕变模型（With Kinematic Hardning Plasticity）和带膨胀的蠕变模型（With Swelling）。

5．非金属塑性材料模型

（1）混凝土材料模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Non-metal Plasticity→Concrete。

（2）D-P 本构模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Non-metal Plasticity→Drucker-Prager。

（3）失效准则

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Non-metal Plasticity→Failure Criteria。

6．铸铁材料模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Cast-Iron。ANSYS 提供了三种可选用的铸铁材料模型：塑性泊松比模型（Plastic Poisson's Ratio），单轴压缩模型（Uniaxial Compression）和单轴拉伸模型（Uniaxial Tension）。

7．形状记忆合金模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Shape Memory Alloy

8．粘弹性材料模型

GUI：单击 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Viscoelastic。ANSYS 提供了曲线拟合（Curve Fitting）、麦克斯韦模型（Maxwell）和 Prony 模型。

21.4 接触分析中的常见问题

21.4.1 接触分析关键字详解

1．K1 关键字

该单元关键字主要用来设置单元自由度，用户可以设置只考虑结构自由度（KEYOPT(1) = 0）；同时考虑结构自由度和温度自由度（KEYOPT(1) = 1）；仅考虑温度自由度（KEYOPT(1) = 2）；同时考虑结构，温度，电压自由度（KEYOPT(1) = 3）；同时考虑温度和电压自由度（KEYOPT(1) = 4）；同时考虑结构和电压自由度（KEYOPT(1) = 5）；仅考虑电压自由度（KEYOPT(1) = 6）；仅考虑电流自由度（KEYOPT(1) = 7）。

2．K2 关键字

该单元关键字用来设置接触算法。用户可以设置接触算法为加强的拉格朗日算法（KEYOPT(2) = 0）这也是 ANSYS 的默认接触算法；用户可以设置接触算法为惩罚函数法

（KEYOPT(2) = 1）；用户可以设置接触算法为多点约束（KEYOPT(2) = 2）；用户可以设置接触法向为拉格朗日乘子法，切向为惩罚函数法（KEYOPT(2) = 3）；用户可以设置接触法向和切向都为完全拉格朗日乘子法（KEYOPT(2) = 4）。

3．K3 关键字

当模型中包含超单元时，K3 关键字可以设置应力状态。KEYOPT(3) = 0，表明模型中只有 *h* 单元，不包含超单元，这也是 ANSYS 的默认设置；KEYOPT(3) = 1，表明含超单元的部分为轴对称；KEYOPT(3) =2，表明含超单元的部分为平面应力/平面应变；KEYOPT(3) =3，表明含超单元的部分为考虑厚度的平面应力。

4．K4 关键字

K4 关键字用来设置检测接触点的位置。KEYOPT(4) = 0，表明使用高斯积分点作为接触检测点，这也是默认设置；KEYOPT(4) = 1，表明使用接触面法线上的节点作为接触检测点；KEYOPT(4) = 2，表明使用垂直于目标面上的节点作为接触检测点；KEYOPT(4) = 3，表明使用接触面法线上的点并结合基于投影面的方法作为接触检测点。当用户使用多点约束方法定义基于面的约束时，按照如下方式使用关键字：对于分布力约束设置 KEYOPT(4) = 1；对于刚性面约束设置 KEYOPT(4) = 2。

5．K5 关键字

K5 关键字用来设置 CNOF/ICONT 的自动调整。KEYOPT(5) = 0，表明初始间隙没有进行自动调整，这也是 ANSYS 的默认设置；KEYOPT(5) = 1，表明通过使用 CONF 的自动值闭合接触间隙；KEYOPT(5) = 2，表明通过使用 CONF 的自动值减小穿透量；KEYOPT(5) = 3，表明通过使用 CONF 的自动值闭合接触间隙并减小接触穿透量；KEYOPT(5) = 3，表面使用自动的 ICONT 值。

6．K6 关键字

K6 关键字用来设置接触刚度变量，当 KEYOPT(10) > 0 时被用来加强刚度更新。KEYOPT(6) = 0，表明使用默认范围来更新刚度；KEYOPT(6) = 1，将名义刚度移至允许的刚度范围内；KEYOPT(6) = 2，将平均刚度移至允许的刚度范围内。

7．K7 关键字

K7 关键字用来设置单元时间增量控制/冲击约束。KEYOPT(6) = 0，表明不使用任何控制；KEYOPT(6) = 1，表明使用自动二等分时间增量算法；KEYOPT(6) = 2，改变接触预测以便保持合理的加载时间与加载载荷的比值增量；KEYOPT(6) = 3，无论什么时候接触状态发生改变，都可以通过改变接触预测的方法来保持最小的加载时间与加载载荷的比值增量；KEYOPT(6) = 4，表明在使用时间增量自动调节时的瞬态动力分析中，对于标准或粗糙接触时，使用冲击约束。

注意：KEYOPT(7) = 2、3 和 4 时就包括了自动调节时间增量。如果 SOLCONTROL, ON,ON，则激活该项功能。

8．K8 关键字

该关键字用来设置对称接触算法，KEYOPT(8) = 0，表明不使用对称算法；KEYOPT(8) = 2，在求解过程中，ANSYS 会在对称的接触对上使用对称接触算法。

9．K9 关键字

该关键字用来设置初始穿透或间隙的影响。KEYOPT(9) = 0，表明同时考虑初始几何穿透或间隙并进行相应的偏移，这也是 ANSYS 的默认设置；KEYOPT(9) = 1，表明不考虑初始几何穿透或间隙也不进行偏移；KEYOPT(9) = 2，表明同时考虑初始几何穿透或间隙和偏移，但是使用斜坡加载考虑影响；KEYOPT(9) = 3，仅考虑偏移，但不考虑初始几何穿透或间隙；KEYOPT(9) = 4，仅考虑偏移，但不考虑初始几何穿透或间隙，但是使用斜坡施加考虑偏移影响；KEYOPT(9) = 5，仅考虑偏移，但不考虑初始几何穿透或间隙，忽略初始接触状态（近场或闭合接触状态）；KEYOPT(9) = 6，仅考虑偏移影响，不考虑初始几何穿透或间隙，但是不考虑斜坡加载效应忽略初始接触状态。

10．K10 关键字

K10 关键字用来设置接触刚度的更新。KEYOPT(10) = 0，如果在载荷步中重新定义了 FKN，则每一个载荷步进行更新接触刚度，这也是默认设置；KEYOPT(10) = 2，基于下伏单元的当前平均应力每一次迭代都更新接触刚度。

11．K11 关键字

该关键字用来设置是否考虑梁/壳体厚度的影响。KEYOPT(11) = 0，表明不考虑梁/壳体厚度影响，这也是默认设置；KEYOPT(11) =2，表面考虑梁/壳体厚度影响。

12．K12 关键字

该关键字用来设置接触类型。KEYOPT(12) = 0，表明使用标准接触，这也是默认设置；KEYOPT(12) = 1，表明接触类型为粗糙接触；KEYOPT(12) = 2，表明接触类型为不分离接触，可以允许滑动；KEYOPT(12) = 3，表明接触类型为粘结接触；KEYOPT(12) = 4，表明接触类型为总是不分离接触；KEYOPT(12) = 5，表明接触类型为总是粘结接触；KEYOPT(12) = 6，表明接触类型初始接触时为粘结接触。

13．K14 关键字

该关键字用来设置流体渗透压力，并且仅对施加了流体渗透压力载荷的接触对有效。KEYOPT(14) = 0，在迭代过程中流体渗透压力发生变化，这也是默认设置；KEYOPT(14) = 1，在整个子步中，流体渗透压力保持常量。

14．K15 关键字

该关键字用来设置接触稳态阻尼的影响。KEYOPT(15) = 0，阻尼仅在第一个载荷步激活，这也是默认设置；KEYOPT(15) = 1，关闭自动阻尼；KEYOPT(15) =2，所有载荷步都激活阻尼；KEYOPT(15) =3，无论前一个子步是什么样的接触状态，都会激活阻尼。

15．K16 关键字

该关键字用来设置尖叫阻尼，并且通过实常数 FDMD 和 FDMS 表示尖叫阻尼。KEYOPT(16) = 0，将 FDMD 和 FDMS 作为比例因子考虑稳定和非稳定阻尼，这也是默认设置；KEYOPT(16) = 1，将 FDMD 作为摩擦滑动中的速度梯度，FDMS 作为稳态阻尼系数；KEYOPT(16) = 2，将 FDMD 作为非稳态阻尼系数，FDMS 作为稳态阻尼系数。

21.4.2 接触分析实常数详解

1．R1 和 R2

对于 CONTA171 和 CONTA172：如果目标单元是圆形，则 R1 表示目标单元的半径；如果

下伏单元是超级单元，并且将超级单元设置为考虑厚度的平面应力单元行为，则 R2 为单元厚度，默认值为 1。

对于 CONTA173 和 CONTA174：如果目标单元形状为圆柱、圆锥或球体，则 R1 表示其半径；R2 表示为圆锥在第二节点处的半径。

2．FKN，FKT，SLTO 和 FTOLN

实常数 FKN 用来定义法向接触刚度因子。通常法向接触刚度因子的取值范围为 0.01～1.0，并且默认值是 1.0。默认值适合于模拟大变形问题。如果模拟弯曲变形，推荐用户使用一个小的数值：0.01～0.1。

注意：默认的接触刚度受到材料性能、单元尺寸和模型的总自由度数影响。在求解过程中，许多因素可能施加到实际的接触法向刚度。

实常数 FTOLN 与增强的拉格朗日方法配合使用。FTOLN 是一个接触面法向的穿透容差因子。FTOLN 取值范围小于 1.0，通常都设置小于 0.2，程序的默认值为 0.1，同时它取决于下伏实体，壳体和梁单元的厚度，如图 21-19 所示。容差因子被用来确定是否满足穿透量协调关系。如果穿透量在允许的容差（FTOLN×下伏单元厚度）之内，则满足接触的协调性。这个厚度取接触对中每一个接触单元厚度的平均值。如果程序检测到穿透量大于这个容差，则认为求解是不收敛的，即便是满足力和位移增量的残差满足收敛准则。通过指定 FTOLN 为负值，设置允许穿透量的绝对值。

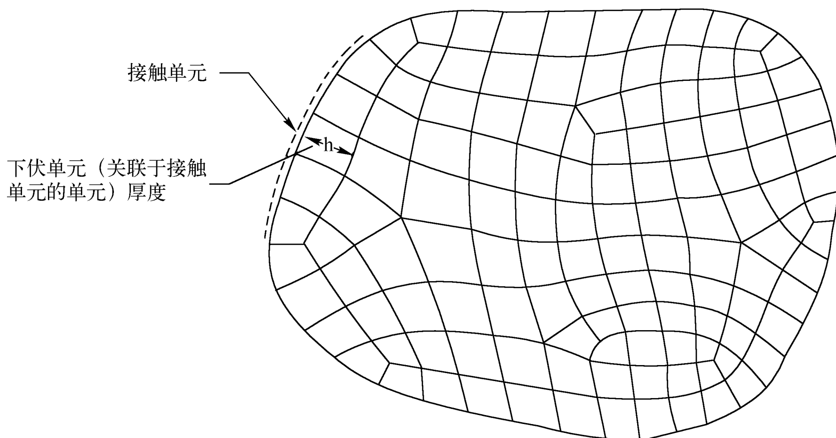


图 21-19　下伏单元厚度示意图

注意：当接触刚度过大例如取 10E16，则由于计算机的精度就不能保证获得一个良好的总体刚度矩阵。在这种情况下，如果允许，则用户应该在模型中按比例缩小力。

实常数 FTOLNFKT 用来定义切向接触刚度。一般情况下，程序会自动定义一个默认的切向刚度值，并且这个刚度值与摩擦因数 μ 和法向接触刚度 FKN 成比例。默认的切向刚度值与默认的法向刚度值 1.0 是一致的。FKT 为正值时代表因子，为负值时代表取切向刚度的绝对值。对于 KEYOPT(10) = 2 或(KEYOPT(2) = 3，程序会基于当前的接触法向压力（PRES）和最大允许弹性滑动值（SLTO）(KT = FKT*MU* PRES/SLTO)来更新切向刚度。

当 FKT 在每一步迭代都进行更新时，实常数 SLTO 被用来控制最大滑动距离。程序提供的默认容差值对于大多数情况都能取得良好的精度。通过定义比例因子（正值）或输入绝对值（负值），用户可以修改 SLTO 的默认值（在接触对中接触单元平均长度的 1%）。较大的 SLOT 取值可以增加其收敛性但会降低计算精度。基于容差值，当前的法向压力和摩擦因数，切向刚度 FKT 可以自动的获得。在一些情况下，用户可以通过定义比例因子或绝对值来修改 FKT。



为了确定一个较好的接触刚度值，可能需要一些经验。用户可以按下面的步骤来进行尝试。

（1）开始时取一个较低的值。低估值要比高估值好，因为由一个较低的接触刚度导致的穿透问题，比过高的接触刚度导致的收敛性困难要容易解决。

（2）对前几个子步进行计算分析，直到确定最终荷载的一个比例（刚好完全建立接触）。

（3）检查每一子步中的穿透量和平衡迭代次数。如果总体收敛困难是由过大的穿透引起的（而不是由不平衡力和位移增量引起的），那么可能低估了 FKN 的值，或者是将 FTOLN 的值取得太小。如果总体的收敛困难是由于不平衡力和位移增量达到收敛值时，需要过多的迭代次数，而不是由于过大的穿透量引起的，那么 FKN 或 FKT 可能被高估。

（4）按需要调整 FKN, FKT, FTOLN 或 SLTO 的值，重新进行完整的分析。

如果穿透控制变成总体平衡迭代中的主因（如果为使问题收敛到穿透容差内，比收敛到不平衡力的容差内，需要更多的迭代），用户应该增大 FTOLN 值，以允许更多的穿透，或增大 FKN。

这四个实常数的作用是确定接触刚度和穿透量，对于增强的拉格朗日算法和罚函数法，都需要定义法向和切向接触刚度。接触面和目标面之间穿透量的大小取决于法向接触刚度。粘结接触的滑动量取决于切向刚度。过大的刚度值可以减小穿透量和滑动量，但会导致总体刚度矩阵病态，从而造成收敛困难。过小的刚度值会引起一定穿透量和滑动量并且会产出一个不精确的解。理想状态是用户应该选取足够大的接触刚度以保证接触穿透小到可以接受，但同时又应该让接触刚度足够小以不致引起总刚矩阵的病态而保证收敛性。

3．PINB

实常数 PINB 用来为球形区域指定一个比例因子（正值），或其绝对值（负值）。用户可以设置 PINB 为任意值。默认时，ANSYS 认为考虑大变形影响并将球形区域半径定义为 4*下伏单元厚度（刚体-柔体接触）或 2*下伏单元厚度（对于柔体-柔体接触）。如果用户关闭大变形影响，则默认的球形区域半径为激活大变形影响的一半。

寻找接触的时间取决于球形区域的尺寸。远场接触单元只需增加少量的计算时间，而近场单元的计算速度非常慢并变得更复杂。一旦单元实际已经发生接触，则计算变得更复杂。

注意：在接触分析中如果发生了接触状态突变，则程序会弹出警告信息。这表明用户设置的子步增量太大或球形区域半径 PINB 太小。

4．ICONT，PMAX，PMIN，CNOF 和 STRM

ANSYS 使用这五个实常数调整初始接触条件。ICONT 用来设置初始接触闭合度，PMAX 用来设置初始允许穿透量的上限，PMIN 用来设置初始允许穿透量的下限，CNOF 用来设置接触面的偏移量，STRM 用来设置渐进穿透的载荷步号。

这五个参数可以独立使用也可以联合起来使用。它们是为了消除由于生成网格造成的数值舍入误差而引起的小间隙或穿透，而不是为了修正网格或几何数据的错误。

（1）CNOF

实常数 CNOF 用来指定一个接触面偏移，指定值为正，使整个接触面偏向目标面，指定值为负则使接触面离开目标面。

注意：如果用户定义了实常数 CNOF 和 PINB，那么必须确保 PINB 的值要大于 CNOF。否则，ANSYS 将忽略 CNOF 实常数。然而，如果用户输入的 CNOF 和 PINB 小于程序的默认值，那么 ANSYS 会自动调整 PINB 以使其大于 CNOF。

用户也可以使用表格输入来定义 CNOF。使用表格输入可以在总体或局部坐标系中把 CNOF 定义为关于时间或空间位置的函数。

（2）ICONT

实常数 ICONT 用来指定一个小的初始接触闭合因子。初始接触闭合因子是指沿着目标面的“调整环”的深度。ICONT 的正值表示相对于下伏单元厚度的比例因子，负值表示接触闭合差的绝对值。如果关键字 KEYOPT(5) = 0, 1, 2 或 3，则 ICONT 的默认值为 0。如果关键字 KEYOPT(5) = 4，ANSYS 会根据模型的几何尺寸提供一个很小但有意义的值赋给 ICONT，并且会弹出一个警告信息。如图 21-20a 所示，任何落在“调整环”域内的接触检查点被自动移到目标面上。如图 21-20b 所示，建议用户使用一个十分小的 ICONT 值，否则可能会发生严重不连续。

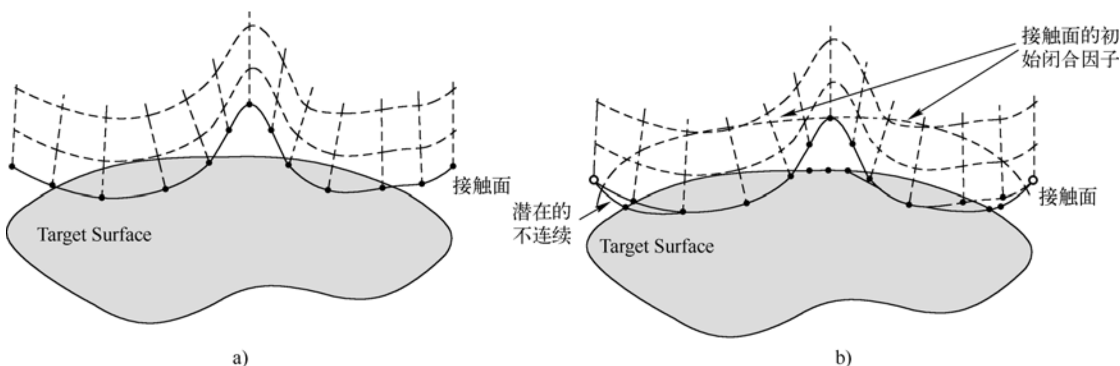


图 21-20　用 ICON 进行接触面的调整

a) 调整之前　b) 调整之后

CNOF 与 ICONT 之间的差别是，前者把整个接触面移动 CNOF 的距离，而后者把所有初始分开的刚好位于调整环 ICONT 内的接触点向目标面移动。

（3）PMIN 和 PMAX

实常数 PMIN 和 PMAX 用来指定初始容许的穿透范围。如图 21-21 所示，当指定 PMAX 或 PMIN 后，在开始分析时，程序会将目标面移到初始接触状态。

如果初始穿透大于 PMAX，程序会调整目标面来减少穿透。接触状态的初始调节仅仅通过平移来实现。如果初始穿透小于 PMIN 并且在 pinball 区域里，ANSYS 会调整目标面以保证模型的初始接触。ANSYS 仅仅在平动方向调整初始接触状态。

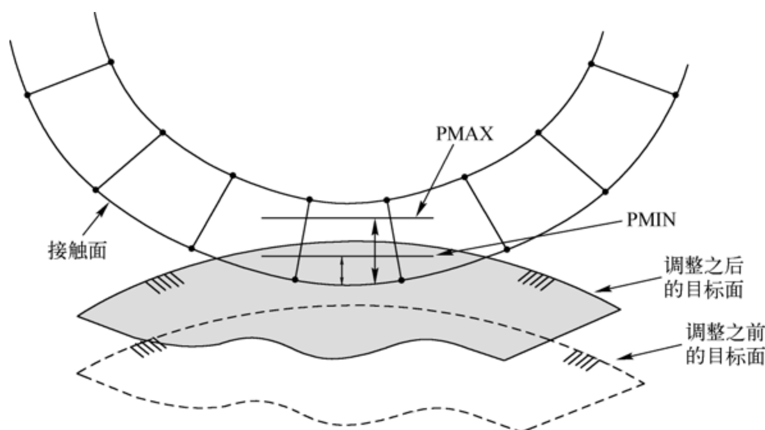


图 21-21 调整接触面 （PMIN, PMAX）

对于给定载荷或给定位移的刚性目标面，将会执行初始接触状态的调整。对没有指定边界条件的目标面，也同样可以进行初始接触状态的调整。当目标面上的所有节点，有给定的零位移值时，使用 PMAX 和 PMIN 的初始调节将不会被执行。

注意：ANSYS 程序独立地处理目标面上节点的自由度。例如：如果用户指定自由度 UX 值为“0”，那么沿着 x 方向就没有初始调整。然而，在 y 和 z 方向仍然会激活 PMAX 和 PMIN 选项。

初始状态调整是一个迭代过程，程序最多进行 20 次迭代。如果目标面仍不能进入可接受的穿透范围（即 PMIN，PMAX），那么将在模型的初始几何形状下进行计算和分析。

这时程序会给出一个警告信息，告诉用户可能需要调整初始几何模型。

5．TAUMAX，COHE，FACT 和 DC

这四个实常数主要用来定义接触对之间的摩擦。在库仑摩擦模型中，定义了一个等效切应力 τ，在某一法向压应力 p 作用下切应力达到此值时表面开始滑动

$$\tau = \mu p + COHE \tag{21-2}$$

式中，μ 为摩擦系数，作为材料特性定义，COHE 为粘聚力。一旦切应力超过此值后，两个表面之间将开始相互滑动。这种状态，叫作滑动状态。粘合/滑动计算决定什么时候一个点从粘合状态到滑动状态，或从滑动状态变到粘合状态。摩擦因数可以是任一非负值，程序默认值为表面之间无摩擦。对于粗糙或绑定接触（KEYOPT(12) = 1、3、5、6），程序将不管给定的 μ 值而认为摩擦阻力无限大。

ANSYS 提供了对经典库仑摩擦扩展的实常数 TAUMAX。TAUMAX 表示最大接触摩擦应力，单位为 Pa。因此，引入最大接触摩擦应力，无论法向接触压力多大，只要摩擦应力达到了最大接触摩擦应力，接触面之间就会发生相对滑动。当接触压力变得非常大时，就要使用 TAUMAX。TAUMAX 的默认值为 1E20。根据经验，最佳的 TAUMAX 值接近于 $\sigma_y/\sqrt{3}$，其中 σ_y 为材料变形过程中的的屈服应力。

如图 21-22 所示，摩擦定律的另一个实常数为粘聚力 COHE，默认值为 0，单位为 Pa。它提供了滑动抗力，甚至法向压力为 0。

摩擦因数依赖于接触面的相对滑动速度，通常静摩擦因数高于动摩擦因数。ANSYS 提供了如下表示的指数衰减摩擦模型：

$$\mu = MU \times (1 + (FACT - 1)\exp(-DC \times V_{rel})) \tag{21-3}$$

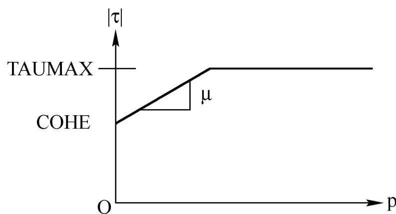


图 21-22　滑动接触抗力

式中，μ 为摩擦系数；MU 为动摩擦因数；$FACT$ 为静摩擦因数与动摩擦因数之比，默认为最小值 1.0；DC 为衰减系数，默认为 0.0，单位为 s/m。因此，时间在静态分析中还是有些意义的。当 DC=0 时，对于滑动接触 $\mu= MU$，对于粘结接触 $\mu= FACT\times MU$；V_{rel} 为 ANSYS 计算的滑动速度。图 21-23 给出了指数衰减曲线，其中静态摩擦因数由下式给出

$$\mu_s = FACT \times MU \tag{21-4}$$

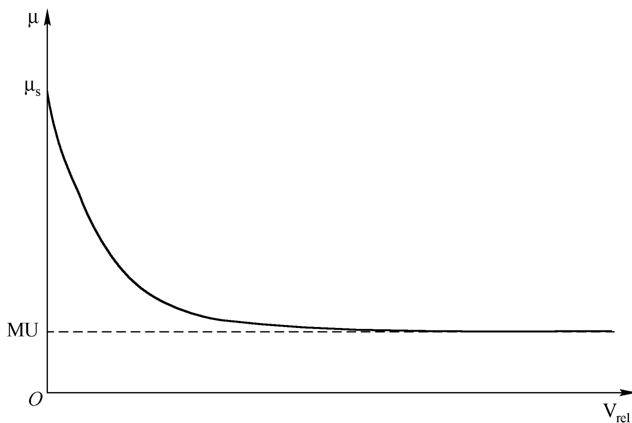


图 21-23　摩擦衰减系数

如果知道静、动摩擦因数和至少一个数据点(μ_1,V_{rel1})，则可以确定摩擦衰减系数为

$$DC = \frac{1}{V_{rel1}} \times \ln\left(\frac{\mu_1 - MU}{(FACT-1)\times MU}\right) \tag{21-5}$$

如果不指定衰减系数，且 MB 大于 1.0，当接触进入滑动状态时，摩擦因数会从静摩擦因数突变到动摩擦因数，这种行为类似于动摩擦模型，因为这会导致收敛困难，所以不建议采用。

6．FKOP

当接触状态为张开时，实常数 FKOP 为施加的刚度因子。FKOP 仅能应用在不分离或绑定接触分析中（KEYOPT(12) = 2～6）。如果 FKOP 以正值输入，则作为比例因子。真实的接触张开刚度等于 FKOP 乘以接触闭合时施加的接触刚度。如果 FKOP 以负值输入，则为真实的接触张开刚度。FKOP 的默认值为 1。

不分离或绑定接触，在接触发生张开时，产生“回拉”力，这个力可能不足以阻止分离。为了减小分离，定义一个较大的 FKOP 值。有些时候，希望接触面分离，但需要在接触面之间建立联系来阻止刚体运动，在这种情况下，可以指定较小的 FKOP 值，以使接触面

之间保持联系（这是“软弹簧”效应）。

7．TCC

为了考虑接触面与目标面之间的热传导，用户需要指定热接触传导系数 TCC。在两个接触面之间热传导的计算公式为



$$q = TCC \times (T_t - T_c) \tag{21-6}$$

式中，q 为单元面积上的热通量（heat flux）；TCC 为热传导系数；T_t 和 T_c 分别表示目标面与接触面相接触时目标面上点的温度和接触面上点的温度。

TCC 可以通过实常数进行定义，通过使用表格%TABLE%选项可以把 TCC 定义为温度 $[(T_c + T_t)/2]$、压力和位置的函数。如果发生接触，一个很小的 TCC 值会产生一些不良的接触，并且温度在界面之间发生间断。对于一个较大的 TCC 值，界面之间的温度不连续将趋于消失，由此产生一个良好的热接触。然而当不存在接触时，则在两个界面之间没有热传递。

为了模拟存在间隙的两个界面的热传导问题，用户需设置关键字 KEYOPT(12)= 4 或 5，定义接触状态为绑定接触或不分裂接触。

8．FHTG 和 FWGT

这两个实常数用来模拟摩擦耗散能量的热生成，FHTG 是转换成热的摩擦耗散能量（默认为 1.0）。FWGT 是接触面和目标面之间热分布的权重系数（默认为 0.5）。

在模拟热-结构耦合的问题中，通过下式定义摩擦耗散率

$$q = FHTG \times \tau \times v \tag{21-7}$$

式中，τ 为等效摩擦应力；v 为滑动率。$FHTG$ 为摩擦耗散能转换成热量的比例系数，默认值为 1，并且也可以作为实常数进行输入。对于 $FHTG = 0$ 情况，应该输入一个很小的值，如果用户输入了 0，那么程序将采用默认值。

在接触面和目标面上摩擦耗散能的计算公式为

$$\begin{cases} q_C = FWGT \times FHTG \times \tau \times v \\ q_T = (1 - FWGT) \times FHTG \times \tau \times v \end{cases} \tag{21-8}$$

式中，q_C 为接触面上的摩擦耗散能；q_T 为目标面上的摩擦耗散能，$FWGT$ 为在接触面和目标面之间的热量分配权重因子，可以作为实常数输入，默认为 0.5。对于 $FWGT = 0$ 情况应该输入一个很小的值，如果用户输入了 0，那么程序将采用默认值。

9．FDMN 和 FDMT

这两个实常数主要用来施加接触稳态阻尼。使用 FDMN 的正值来指定法向的阻尼比例因子，默认值为 1。通过指定一个负值，用户能够修改内部法向阻尼系数。该阻尼系数的单位：Pa/(m/s)。对于基于力的接触模型，阻尼系数的单位为 N/(m/s)。

使用 FDMT 的正值来指定切向的阻尼比例因子。只有激活法向阻尼系数后，才能激活切向接触阻尼。FDMT 的默认值为 0.001。用户通过指定 FDMT 为负值来覆盖内部计算的切向阻尼系数。该阻尼系数的单位：Pa/(m/s)。对于基于力的接触模型，阻尼系数单位 N/(m/s)。

10．TBND

在大多数焊接过程中，当与材料相关联的接触面超过临界温度后，表面开始融合并且其他部分开始凝固。为了模拟这一现象，用户可以使用 TBND 指定临界温度。对于闭合接触面上的温度 T_c，一旦超过熔点，接触就会变成“绑定接触”。这种接触状态在接下来的分析中一致保持绑定接触，即便随后温度下降到熔点以下。接触表面温度 T_c 从耦合的热-结构分析求解的温度场中获得。

21.4.3 接触对的正确法向

当程序进行是否接触的检查时，接触面的外法线方向至关重要。对于 3D 单元 CONTA173 和 CONTA174，按节点顺序号以右手法则来决定单元的外法向。接触面的外法向应该指向目标面。否则，在开始分析计算时，程序可能会认为是有过度穿透的面，而很难找到初始解。在这些情况下，程序一般会立即停止执行。图 21-24 说明正确和不正确的外法向。对于 3D 线-线接触单元 CONTA176 和 3D 线-面接触单元 CONTA177, 接触节点必须按顺序定义在连续的线端上。

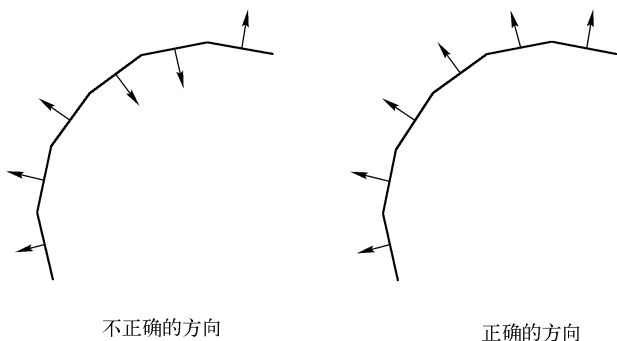


图 21-24　定义接触单元的外法向

当发现单元的外法线方向不正确时，必须通过反转所选择的不正确单元的节点号来改变它们。

命令：ESURF ,,REVE

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Surf/Contact→Surf to Surf

重新定向单元法向。

命令：ENORM

GUI：单击 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Elements→Shell Normals

21.4.4 接触算法简介

1．完全罚函数法（Pure Penalty Method）

完全罚函数法计算时需要提供法向和切向刚度矩阵。完全罚函数的主要缺点是，两个接触面之间的穿透量取决于这个刚度矩阵。过高的刚度值会减小穿透总量，产生病态的总体刚

度矩阵从而导致计算收敛困难。

2．增强的拉格朗日方法（Augmented Lagrangian Method）

增强的拉格朗日方法是为了找到精确的拉格朗日乘子（即接触力），并对罚函数进行一系列修正迭代。在方程的平衡迭代过程中增大接触附着力（压力和摩擦应力）以便最终的穿透值小于允许的容差值（FTOLN）。与罚函数的方法相比，拉格朗日方法容易得到良态条件，对接触刚度的敏感性较小。然而，在有些分析中，特别是在变形后网格变得太扭曲时，增强的拉格朗日方法可能需要更多的迭代。

3．纯拉格朗日方法（Pure Lagrange Multiplier Method）

当存在粘结接触并且当接触是闭合的且是“零滑动”时，纯拉格朗日乘子算法会施加零穿透值。纯拉格朗日算法不要求接触刚度：FKN 和 FKT。取而代之的是颤振控制参数（Chattering Control Parameters）：FTOLN 和 TNOP。这种方法在模型中添加了接触附着力并把它作为模型的一个自由度，并要求增加迭代次数以使接触状态稳定。这种方法与增强的拉格朗日方法相比增加了计算量。

4．混合算法

ANSYS 提供了一种混合算法，即在接触法向使用拉格朗日乘子法，接触切向使用罚函数法。对于粘结接触状态，这种方法强制施加零穿透值并且允许小滑动。它也要求颤振控制参数 FTOLN 和 TNOP，还有允许的弹性滑动参数 SLTO 的最大值。

21.5　动力学分析常见问题

21.5.1　动力学分析类型作用和联系

ANSYS 提供了完备的动力学分析技术，包括模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析和谱分析。这些分析类型都是基于弹性体建立的。模态分析用来确定结构的基本动力学属性，包括固有频率和对应的振型。这两个参数对于评估结构的动力学特性非常关键，如安装在结构上的旋转设备，为避免其过大的振动，必须判断转动部件的频率是否接近结构的任何一阶固有频率。此外，这两个参数是采用振型（模态）叠加法进行后续动力学计算的必备条件。瞬态动力学分析功能主要用来评估结构承受随时间变化的规律性载荷的响应，即在时域内计算动力学响应；谐响应分析和谱分析是在频域内评估结构的动力学响应。其中，谐响应分析用来评估载荷幅值为常量，但激励频率是变化的；谱分析用来描述随机载荷作用于结构的响应，其中载荷的大小和频率都是随机变化的。

21.5.2　动力学基本方程

1．瞬态动力学方程

ANSYS 计算动力学的基本方程是

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F\} \tag{21-9}$$

式中，$\{u\}$ 为节点位移；$\{\dot{u}\}$ 为节点速度，$\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度，$[M]$ 为总体质量矩阵；$[C]$ 为总体阻尼矩阵；$[K]$ 为总体刚度矩阵；$\{F\}$ 为结构的外载荷。ANSYS 提供了两种总体质量矩

阵：一致质量矩阵（默认）和集中质量矩阵。设置方法：勾选面板中的 Use lumped mass approx。

总体质量矩阵由密度参数生成，因此进行动力学分析时必须输入密度。式（21-9）为瞬态动力学的基本方程，ANSYS 使用三种方法求解式（21-9），分别是完全法，模态叠加法和缩减法。完全法和缩减法采用直接积分求解瞬态动力学平衡方程，即使用 Newmark 方法和改进后的 HHT 方法；模态叠加法使用坐标转换把式（21-9）进行解耦后开始求解。

2．模态方程

将式（21-9）中的$[C]$和$\{F\}$取 0，则转换为模态分析的基本方程

$$[M]\{\}\ddot{u}+[K]\{u\}=0 \tag{21-10}$$

ANSYS 假设模态分析为线性行为，因此总体质量矩阵和总体刚度矩阵都为常量。

对于线性系统，式（21-10）解的形式为

$$\{u\}=\{\phi\}_i\cos\omega_i t \tag{21-11}$$

式中，$\{\phi\}_i$为第i阶模态对应的振型特征向量；ω_i为第i阶模态的固有频率 (单位：rad/s)；t为时间（单位：s）。

将式（21-11）代入式（21-10）中，整理后得

$$\det\left|([K]-\omega_i^2[M])\right|=0 \tag{21-12}$$

式（21-12）的另外一种表述为

$$[K]\{\phi_i\}=\omega_i^2[M]\{\phi_i\} \tag{21-13}$$

ANSYS 提供了 5 种方法，求解式（21-12）。在下一小节中将详细介绍。

3．谐响应方程

在谐响应分析中，结构中的所有节点都以相同频率，不同的相位运动。结构中各点的阻尼不同，导致相位的不同。结构的位移表达式如下

$$\{u\}=\{u_{\max}e^{\mathrm{i}\Phi}\}e^{\mathrm{i}\Omega t} \tag{21-14}$$

式中，$u_{\max}$为最大位移；i 为单位复数，即-1 的方均根；Ω为强迫圆频率（rad/s）=2πf；f为强迫频率（Hz）；t为时间；Φ为位移相位偏移（单位：rad）。

力矢量指定为与位移具有相同表达式，即

$$\{F\}=\{F_{\max}e^{\mathrm{i}\Psi}\}e^{\mathrm{i}\Omega t} \tag{21-15}$$

式中，$F_{\max}$为力幅值；Ψ为力的相位

将式（21-14）和式（21-15）代入式（21-9）中，得

$$(-\Omega[M]+\mathrm{i}\Omega[C]+[K])(\{u_1\}+\mathrm{i}\{u_2\})=\{F_1\}+\mathrm{i}\{F_2\} \tag{21-16}$$

式（21-16）就是谐响应求解的基本方程。ANSYS 提供了完全法、缩减法和模态叠加法三种求解方法，来求解式（21-16）。

21.5.3 模态分析中的常见问题

1．模态求解方法

图 21-25 给出了 ANSYS 求解模态问题的 7 种方法，其中 5 种方法用于求解无阻尼系

统，2 种方法求解有阻尼系统。本书只给读者介绍 5 种求解无阻尼系统的方法。

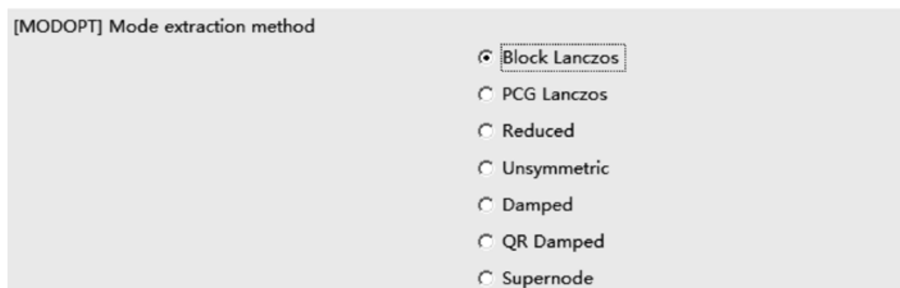


图 21-25　ANSYS 提供的模态求解方法

（1）Block Lanczos

Block Lanczos 法特征值求解器是默认的求解器，这种方法和子空间法一样精确，但速度更快。无论 EQSLV 命令指定过何种求解器进行求解，分块 Lanczos 法都将自动采用稀疏矩阵方程求解器。计算某系统特征值谱所包含一定范围的固有频率时，采用分块 Lanczos 法方法提取模态特别有效。

（2）PCG Lanczos

内部采用子空间迭代计算，但采用 PCG 迭代求解器。这种方法明显比子空间法和分块 Lanczos 法快。但是，Power Dynamics 法不进行 Sturm 序列检查，即不检查模态遗漏问题，这可能影响有多个重复频率问题的解。此法总是采用集中质量近似算法，即自动采用集中质量矩阵（LUMPM，ON）。

（3）Reduced

缩减法采用 HBI 算法（Householder-二分-逆迭代）来计算特征值和特征向量。由于该方法采用一个较小的自由度子集，即主自由度来计算，因此计算速度更快。主自由度（DOF）导致计算过程中会形成精确的$[K]$矩阵和近似的$[M]$矩阵。因此，计算结果的精度将取决于质量阵$[M]$的近似程度，近似程度又取决于主自由度的数目和位置。

（4）Unsymmetric

非对称法也采用完整的$[K]$和$[M]$矩阵，适用于刚度和质量矩阵为非对称的问题。此法采用 Lanczos 算法，如果系统是非保守的（例如轴安装在轴承上），这种算法将解得复数特征值和特征向量。特征值的实部表示固有频率，虚部是系统稳定性的量度，当虚部为负值，表示系统是稳定的，而正值表示系统是不稳定的。该方法不进行 Sturm 序列检查，因此有可能遗漏一些高频端模态。

（5）Supernode

该方法适用于求解自由度大于 10000 且具有对称性的问题，基于该求解器的模态迭代加法进行瞬态的动力学的求解精度较高。如果用户使用该方法求解，则不能使用集中质量矩阵。

2．重复频率

模态计算中，经常会遇到频率相等的情况，出现这种计算结果的原因主要是模型具有一定的对称性，这说明振型是不唯一的，但是可以为相等的频率建立相互正交的振型。



3．模态求解自由度

ANSYS 提取的最大阶数等于模型节点数量与节点自由度的乘积。如图 21-26 给出了一个平面有限元模型，由图 21-26 可知该模型共有 12 个节点，对于平面模型每一个节点的自由度为 2，因此模态计算提取的最大阶数等于 12×2=24。

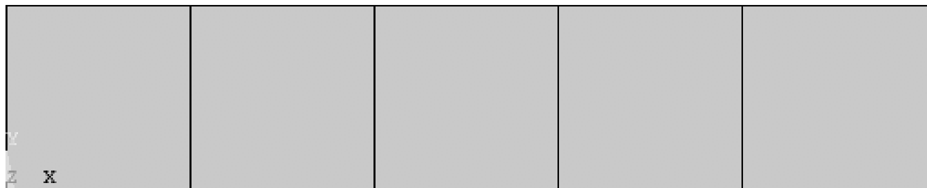


图 21-26　平面有限元模型

4．模态计算结果为 0

这个问题可以从式（21-12）进行解释，对于总体刚度矩阵，初始情况下为奇异矩阵，通过施加位移约束可以消除总体刚度的奇异性。为了满足式（21-12）的行列式等于 0，当模型约束不足或无约束时，就会出现固有频率等于 0。对于二维平面模型的无约束模态计算前三阶为 0，三维模型的无约束模态计算的前 6 阶为 0，梁单元和壳体单元模型的无约束模态计算的前 6 阶为 0。

5．提取振型参与系数

（1）打开参数提取面板

GUI：Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data，弹出如图 21-27 所示的提取标量数据面板。

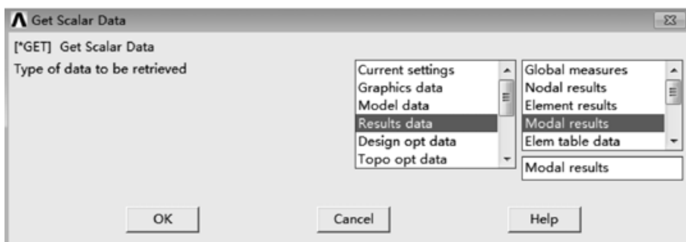


图 21-27　提取标量数据面板

（2）设置提取结果

在面板的右侧选择结果数据（Results data），右侧选择模态结果（Modal results），单击 OK，弹出如图 21-28 所示的提取模态结果面板，设置定义的参数名（Name of parametre to be defined）、模态阶数（Mode number N）和提取的模态数据类型（Modal data to be retrieved）。

21.5.4 谐响应分析中常见问题

1．谐响应载荷

谐响应施加的载荷为 $\{F\}=\{F_{max}e^{i\Psi}\}e^{i\Omega t}$，其中 F_{max} 为载荷幅值；Ψ 为相位角，Ω 为载

荷激励频率。因此，一个完整的简谐载荷需要输入三条信息：幅值（Amplitude）、相位角（Phase angle）和激励频率范围（Forcing frequency range），如图 21-29 所示。

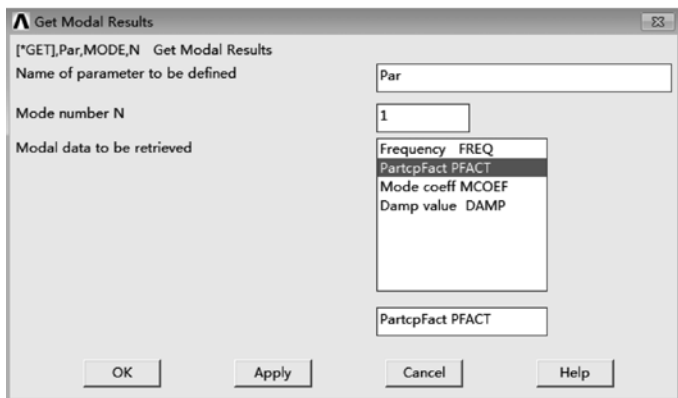


图 21-28 提取模态结果面板

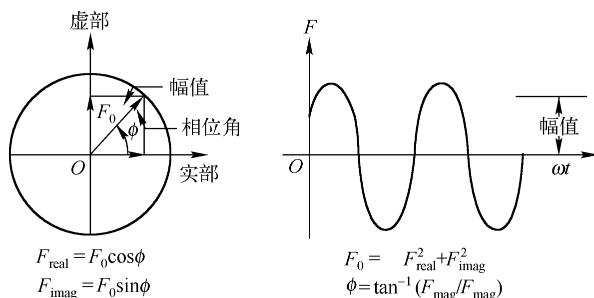


图 21-29 实部/虚部分量和振幅/相位角间的关系

幅值（Amplitude）指载荷的最大值，相位角（Phase angle）指载荷滞后（或领先）于参考时间的量度。如图 21-29 所示，在复平面上相位角是以实轴为起始的角度。当同时要定义多个相互间存在相位差的简谐载荷时，必须分别指定相位角。如图 21-30 给出了谐响应分析施加载荷面板，使用面板中的 VALUE 和 VALUE2 域来指定有相位角载荷的实部和虚部。压力、分布载荷和体载荷只能指定 0 相位角（即不能定义载荷的虚部）。图 21-30 显示了计算实部和虚部的公式。激励频率范围（Forcing frequency range）指简谐载荷（以周/单位时间为单位）的频率范围。

2．谐响应载荷步设置的问题

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq and Substps，弹出谐响应频率和载荷步设置面板，如图 21-31 所示，该面板包括以下三个选项。

（1）指定谐响应频率范围（Harmonic freq range）

在谐响应分析中必须指定强制频率范围（以周/单位时间为单位，即 Hz），然后要指定在此频率范围内要计算出的解的数目。

（2）指定频率范围内的子步（Number of substeps）

可用此选项请求计算任何数目的谐响应解。所计算解（或子步）将均布在指定的频率范围



内[HARFRQ]。例如，如果在 30～40Hz 范围内要求出 10 个解，程序将计算出在频率为 31Hz，32Hz，33Hz，…，39Hz 和 40Hz 处的响应，而不计算频率范围低端处（30Hz）的响应。

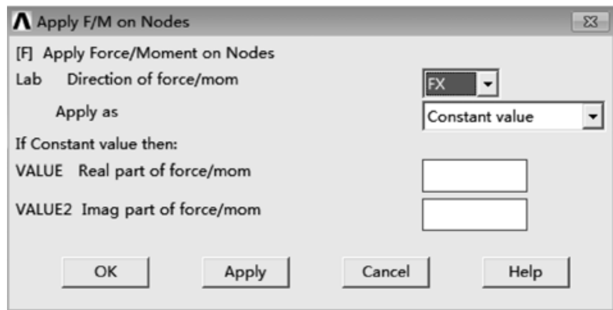


图 21-30 谐响应分析施加载荷面板

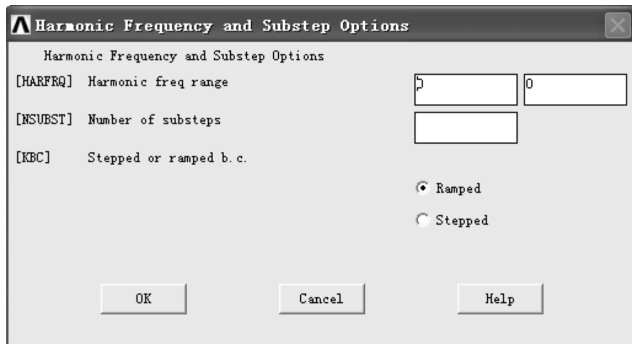


图 21-31 谐响应频率和载荷步设置面板

（3）指定载荷增加方式（Stepped or ramped b.c）

载荷可以是 Stepped 或 Ramped 方式变化的。默认时方式为 Ramped，即载荷的幅值随各子步逐渐增长。如果设置了 Stepped 载荷，则在频率范围内的所有子步中载荷将保持恒定的幅值。

21.5.5 瞬态动力学分析中常见问题

1．选择瞬态动力学求解方法

对于完全法和缩减法，ANSYS 使用隐式方法 Newmark 和 HHT 求解瞬态问题。如果时间步长和时间积分参数的设置一样，那么 HHT 方法比 Newmark 方法求解的精度更高。用户可以使用求解控制面板设置瞬态动力学算法。

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出求解控制面板，选择瞬态分析子选项（Transient），弹出瞬态动力学算法设置面板，如图 21-32 所示，ANSYS 默认设置为纽马克算法（Newark

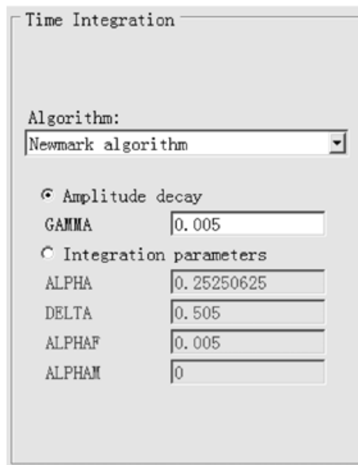


图 21-32 瞬态动力学算法设置面板

algorithm），用户可以通过 Algorithm 设置算法为 HHT。

2．设置瞬态动力学阻尼

瞬态动力学的阻尼只能考虑瑞雷阻尼。瑞雷阻尼是工程设计中一种常用的阻尼，其阻尼矩阵具有以下形式

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \tag{21-17}$$

式中，$[C]$为阻尼矩阵；$[M]$为总体质量矩阵；$[K]$为总体刚度矩阵；α为质量阻尼系数；β为刚度阻尼系数。

α阻尼在模型中引入任意大质量时会导致不理想的结果。一个常见的例子是在结构的基础上加一个任意大质量以方便施加加速度谱。α阻尼系数在与质量矩阵相乘后会在这样的系统中产生非常大的阻尼力，这将导致谱输入的不精确以及系统响应的不精确。

β阻尼和材料阻尼在非线性分析中会导致不理想的结果。这两种阻尼要和刚度矩阵相乘，而刚度矩阵在非线性分析中是不断变化的。由此所引起的阻尼变化有时会和物理结构的实际阻尼变化相反。例如，存在由塑性响应引起的软化的物理结构，通常相应地会呈现出阻尼的增加，而存在β阻尼的 ANSYS 模型在出现塑性软化响应时则会呈现出阻尼的降低。

GUI：单击 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls，弹出求解控制面板，选择瞬态分析子选项（Transient），弹出阻尼系数设置面板，如图 21-33 所示，ALPHA 表示质量阻尼系数α，BETA 表示刚度阻尼系数β。

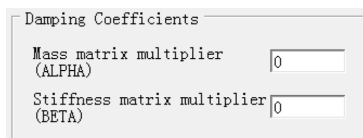


图 21-33 阻尼系数设置面板

21.5.6 谱分析中常见问题

1．模态合并方法

GUI：单击 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Spectrum→PSD→Mode Combine，弹出模态合并方法设置面板，如图 21-34 所示。

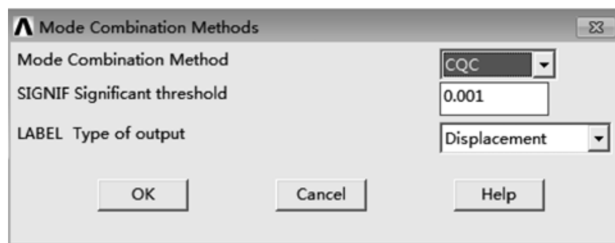


图 21-34 模态合并方法设置面板

如图 21-34 所示该面板包括三个子选项：模态合并方法（Mode Combination）、阈值（SIGNIF）和输出类型（Type of output）。

ANSYS 提供了六种模态合并方法，即完全二次方合并方法（CQC）、分组法（GRP）、二倍和方法（DSUM）、方均根方法（SRSS）、NRL 求和法（NRLSUM）和 Rosenblueth 方法（ROSE）。

对于合并模态，这些方法就是计算其系数。合并模态的一般方法就是方均根法，其他方法都是由它变化而来的。方均根的标准形式

$$R_a=\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\varepsilon_{ij}R_iR_j\right)^{\frac{1}{2}} \tag{21-18}$$

式中，R_a 为总的模态响应；N 为扩展模态的总数；ε_{ij} 为耦合系数，$\varepsilon_{ij}=0$ 时表明模态 i 和 j 是相互独立的，随着两个模态的相关性增加耦合系数可以达到 1；R_i 为第 i 阶的模态响应；R_j 为第 j 阶的模态响应；A_i 为第 i 阶模态的模态系数；A_j 为第 j 阶模态的模态系数；Ψ_i 为第 i 阶模态振型；Ψ_j 为第 j 阶模态振型。

Ψ_i 和 Ψ_j 可能是自由度响应，反力或应力，而自由度响应，反力或应力可能是位移，速度或加速度，这取决于用户的需求。通过模态合并命令，模态合并数据被写入到 File.MCOM。

（1）完全二次方合并方法

该方法是 Wilson 提出的，即

$$R_a=\left(\left|\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}k\varepsilon_{ij}R_iR_j\right|\right)^{\frac{1}{2}} \tag{21-19}$$

式中，如果 $i=j$，则 $k=1$；如果 $i\neq j$，则 $k=2$。

$$\varepsilon_{ij}=\frac{8(\varepsilon_i'\varepsilon_j')^{\frac{1}{2}}(\varepsilon_i'+r\varepsilon_j')r^{3/2}}{(1-r^2)^2+4\varepsilon_i'\varepsilon_j'r(1+r^2)+4(\varepsilon_i'^2+\varepsilon_j'^2)r^2}；\quad r=\omega_j/\omega_i$$

（2）GRP 方法

$$R_a=\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\varepsilon_{ij}\left|R_iR_j\right|\right)^{\frac{1}{2}} \tag{21-20}$$

式中，如果 $\left|\frac{\omega_j-\omega_i}{\omega_i}\right|\leqslant 0.1$，则 $\varepsilon_{ij}=1$；如果 $\left|\frac{\omega_j-\omega_i}{\omega_i}\right|>0.1$，则 $\varepsilon_{ij}=0$。

（3）DSUM 方法

$$R_a=\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\varepsilon_{ij}\left|R_iR_j\right|\right)^{\frac{1}{2}} \tag{21-21}$$

式中，$\varepsilon_{ij}=\dfrac{1}{1+\left(\dfrac{\omega_i'-\omega_j'}{\xi_i''\omega_i+\xi_j''\omega_j}\right)^2}$；$\omega_i'$ 为第 i 阶模态考虑阻尼的固有频率；ω_i 为第 i 阶无阻尼固有频率；ε_i'' 为第 i 阶模态修正的阻尼比。

通过下式计算有阻尼固有频率

$$\omega_i'=\omega_i(1-(\xi_i')^2)^{\frac{1}{2}} \tag{21-22}$$

考虑地震持续时间定义的修正阻尼比 ξ_i''

$$\xi_i''=\xi_i'+\frac{2}{t_d\omega_i} \tag{21-23}$$

式中，t_d 为地震持续时间。

（4）SRSS 方法

The SRSS 方法是式（21-18）的简化形式，即

$$R_a = \left(\sum_{i=1}^{N} (R_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{21-24}$$

（5）NRL-SUM 方法

The NRL-SUM 方法计算最大模态响应

$$R_a = \left| R_{a1} \right| + \left(\sum_{i=2}^{N} (R_{ai})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{21-25}$$

式中，$\left| R_{a1} \right|$ 为模型中在某一点的最大模态位移，模态应力或模态反力的绝对值；R_{ai} 为来自其他模态中相同点对位移，应力或反力的贡献。

（6）Rosenblueth 方法

Rosenblueth 方法关联于 ROSE 命令，它的定义式为

$$R_a = \left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \varepsilon_{ij} R_i R_j \right)^{\frac{1}{2}} \tag{21-26}$$

2．谱分析中选项 SIGNIF 含义求解

图 21-34 中的 SIGNIF 选项，用来设置阈值。通过阈值可以控制参与模态合并的数量，即只有模态响应大于设置的阈值的模态才会参与模态合并计算。

21.6 后处理中常见问题

用户在求解模型之后，主要通过查看应力结果来评估模型是否符合工程设计要求，在 ANSYS 中可以输出当前激活坐标系下六个方向的应力、三个方向的主应力、应力强度（Stress intensity）、von Mises 应力、塑性等效应力（Platic eqivalent stress）、应力状态比（Stress state ratio）和静水压力（Hydrostatic pressure）。下面首先详细讲解各个应力的含义，然后结合工程强度理论介绍如何应用求解的应力结果。

21.6.1 输出应力的含义

如图 21-35 给出了一个单元的应力矢量图，由图可知单元共有六个应力矢量，分别是 σ_x、σ_y、σ_z、σ_{xy}、σ_{yz} 和 σ_{xz}。

1．主应力

主应力通过求解应力分量的三次方程获得，即

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_y - \sigma \end{vmatrix} = 0 \tag{21-27}$$

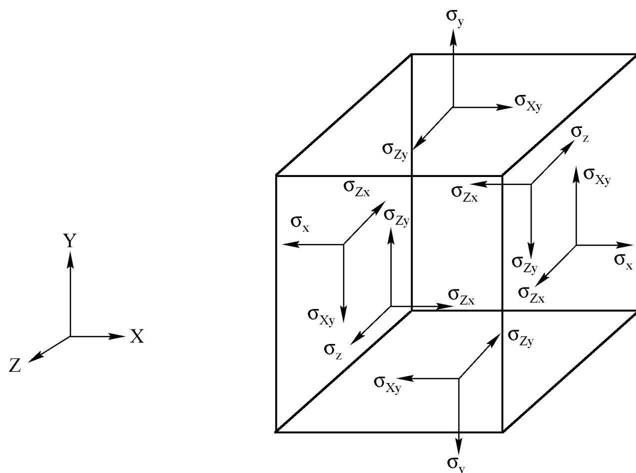


图 21-35　单元的应力矢量图

将式（21-27）展开得

$$\begin{aligned}&\sigma^3-(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)\sigma^2+(\sigma_y\sigma_z+\sigma_z\sigma_x+\sigma_x\sigma_y-\tau_{yz}^2-\tau_{zx}^2-\tau_{xy}^z)\sigma\\&-(\sigma_x\sigma_y\sigma_z-\sigma_x\tau_{yz}^2-\sigma_y\tau_{zx}^2-\sigma_z\tau_{xy}^2+2\tau_{yz}\tau_{zx}\tau_{xy})=0\end{aligned} \quad (21-28)$$

式（21-28）即为求解主应力的公式，设 σ_1， σ_2 和 σ_3 为三个主应力，则

$$(\sigma-\sigma_1)(\sigma-\sigma_2)(\sigma-\sigma_3)=0$$

将上式展开得

$$\sigma^3-(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)\sigma^2+(\sigma_2\sigma_3+\sigma_3\sigma_1+\sigma_1\sigma_2)\sigma-\sigma_1\sigma_2\sigma_3=0$$

对比两式，得

$$\lambda_1=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3=\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z$$

$$\lambda_2=\sigma_2\sigma_3+\sigma_3\sigma_1+\sigma_1\sigma_2=\sigma_y\sigma_z+\sigma_z\sigma_x+\sigma_x\sigma_y-\tau_{yz}^2-\tau_{zx}^2-\tau_{xy}^z$$

$$\lambda_3=\sigma_1\sigma_2\sigma_3=\sigma_x\sigma_y\sigma_z-\sigma_x\tau_{yz}^2-\sigma_y\tau_{zx}^2-\sigma_z\tau_{xy}^2+2\tau_{yz}\tau_{zx}\tau_{xy}$$

以上三式为三个应力不变量。

用 σ_1,σ_2 和 σ_3 表示三个主应力在 ANSYS 以 S1，S2，S3 输出。把主应力进行排序以便使得 σ_1 大多数情况为正值（拉应力）， σ_3 大多数情况负值（压应力）。

2．应力强度

应力强度 σ_{I} 在 ANSYS 中以 SINT，它的计算式为

$$\sigma_{\mathrm{I}}=\max(|\sigma_1-\sigma_2|,|\sigma_2-\sigma_3|,|\sigma_3-\sigma_1|) \quad (21-29)$$

3．等效应力

von Mises 应力或等效应力 σ_{e} （ANSYS 里以 SEQV 形式输出）的计算式

$$\sigma_e=\left\{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]\right\}^{1/2} \quad (21-30)$$

或

$$\sigma_e=\left\{\frac{1}{2}[(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2+6(\sigma_{xy}^2+\sigma_{yz}^2+\sigma_{xz}^2)]\right\}^{1/2} \tag{21-31}$$

21.6.2 常用强度理论



由于材料破坏的基本形式可分为脆性断裂和塑性流动两类，相应的强度理论也可以分为关于脆性断裂破坏的强度理论和关于塑性流动破坏的强度理论两类。前者如最大拉应力理论、最大拉应变理论；后者如最大切应力理论和形状改变比能理论。

1．最大拉应力理论

最大拉应力理论又称为第一强度理论。十七世纪时，工程上使用的材料主要是砖、石、铸铁等，材料的破坏形式主要是脆性断裂，因此出现了最大正应力理论，后来修正为最大拉应力理论。这个理论认为，使材料发生断裂破坏的主要因素是最大拉应力，即不论材料在什么复杂应力状态下，只要最大拉应力达到由简单拉伸试验所测得的极限应力$\sigma_{\lim}$，就会引起材料的断裂破坏，其破坏条件为$\sigma_1=\sigma_{\lim}$，将极限应力除以安全系数n，得到许用应力$[\sigma]$。于是，据此理论建立的强度条件为

$$\sigma_1\leqslant[\sigma] \tag{21-32}$$

试验表明，对于砖石、铸铁等脆性材料，此理论较为适合，如铸铁等脆性材料在单向拉伸时，断裂破坏发生在拉应力最大的横截面上，扭转破坏也发生在拉应力最大的斜截面上。但是，此理论没有考虑其他两个主应力σ_2和σ_3对材料破坏的影响，而且对于没有拉应力的应力状态（如单向压缩、三向压缩等）也无法应用。

2．最大拉应变理论

最大拉应变理论又称为第二强度理论．这一理论是由最大线应变理论修正得到的。这个理论认为，使材料发生断裂破坏的主要因素是最大拉应变，亦即不论材料在什么复杂应力状态下，只要最大拉应变达到了简单拉伸发生破坏时的极限值ε_{jx}时，就会引起材料的断裂破坏，因此破坏条件为$\varepsilon_1=\varepsilon_{jx}$。假设材料在断裂破坏前，始终服从虎克定律，即$\varepsilon_{jx}=\dfrac{\sigma_{\lim}}{E}$，则把广义虎克定律代入后，可得出以主应力表示的破坏条件$\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)=\sigma_{\lim}$，将$\sigma_{\lim}$除以安全系数，得到许用应力，于是据此理论建立的强度条件为

$$\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)\leqslant[\sigma] \tag{21-33}$$

这个理论可以较好地解释岩石等脆性材料在单向压缩时沿纵向开裂的脆断现象，但并不为金属材料的试验所证实。根据对塑性材料的强度研究，它和某些实验相矛盾，另外在各方向均匀压缩时，这个理论也未被证实。实验表明，该理论只适用于脆性材料。

3．最大切应力理论

最大切应力理论又称为第三强度理论，十九世纪开始，工程上大量使用钢材，这些材料塑性性能好，其主要破坏形式是塑性流动。这个理论认为，使材料发生流动破坏的主要因素是最大切应力，亦即不论材料在什么复杂应力状态下，只要最大切应力达到了简单拉伸时的极限值τ_s，就会引起材料的流动破坏。这一极限值就是材料在单向拉伸出现流动时的最大切应力。因此破坏条件为

$$\tau_{\max}=\tau_s$$

在三向应力状态下

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

在单向拉伸下出现流动时的最大切应力 τ_s 与极限应力 σ_s 的关系为

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}$$

于是，流动破坏条件可表示为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

将 σ_s 除以安全系数得到许用应力 $[\sigma]$，于是据此理论建立的强度条件为

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leqslant [\sigma] \qquad (21\text{-}34)$$

这个理论也称为屈雷斯卡（H.Tresca）理论。一些试验结果表明，最大切应力理论对于塑性材料是相当符合的，在机械工程中得到了广泛应用。但是这个理论忽略的中间主应力 σ_2 的影响，使得在二向应力状态下计算结果偏于安全。

4．形状改变比能理论

形状改变比能理论又称为第四强度理论。它认为形状改变比能是引起材料流动破坏的主要因素。亦即不论材料在什么复杂应力状态下，当形状改变比能达到某一极限值时，材料就发生流动破坏，这个极限值就是材料在单向拉伸下发生流动时的形状改变比能 u_{jx}。

三向应力状态下的形状改变比能，即

$$u_x = \frac{1+\mu}{3E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1]$$

在计算单向拉伸下出现流动时的形状改变比能时，令上式中的 $\sigma_1 = \sigma_s, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$，即可得

$$u_{jx} = \frac{1+\mu}{3E}\sigma_s^2$$

对应于这个理论的流动破坏条件为

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} = \sigma_s$$

将 σ_s 除以安全系数得到许用应力 $[\sigma]$，于是据此理论建立的强度条件为

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} \leqslant [\sigma] \qquad (21\text{-}35)$$

或

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^3 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leqslant [\sigma] \qquad (21\text{-}36)$$

这个理论也称为米赛斯（R·Von·Mises）理论，对于钢材等塑性材料，这个理论与实验结果很符合，在二向应力状态下，比第三强度理论更接近实际，是目前对塑性材料广泛采用的理论。

以上列举的四个强度理论，在工程设计中得到了广泛的应用。应该指出，由于材料的破坏形式不仅与材料本身的性质有关，而且与材料所处的应力状态有关。即使同一种材料在不

同的应力状态下也可能有不同的破坏形式。因此，严格地说，应根据材料的破坏形式而不是根据材料来选择相应的强度理论。但一般说来，脆性材料在通常的情况下，以脆性断裂的形式破坏，所以宜采用第一和第二强度理论，而塑性材料在通常的情况下却大多产生塑性流动形式的破坏，所以宜采用第三和第四强度理论。但是，无论是塑性材料或脆性材料，在三向拉应力接近相等的情况下，都以脆性断裂形式破坏，所以应采用第一强度理论，而在三向压应力接近相等的情况下，都可引起塑性变形，所以应采用第三或第四强度理论。



21.6.3 失效准则

失效准则被用来估计材料失效的可能性。失效准则可以用于一个方向比另一个方向弱的正交各向异性材料。在 POST1 中可以用于所有的板、壳和实体结构单元（使用 FC 命令）。图 21-36 给出了后处理中可查看的失效模式。下面给读者详细介绍其理论。

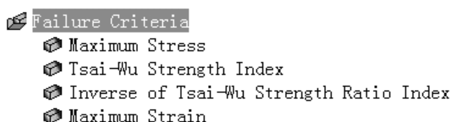


图 21-36　ANSYS 后处理失效准则

1．最大应变失效准则

该准则对应于后处理失效准则中的 Maximum Strain。

$$\xi_1 = \max\begin{cases} \dfrac{\varepsilon_{xt}}{\varepsilon_{xt}^f} \text{或} \dfrac{\varepsilon_{xc}}{\varepsilon_{xc}^f} \\ \dfrac{\varepsilon_{yt}}{\varepsilon_{yt}^f} \text{或} \dfrac{\varepsilon_{yc}}{\varepsilon_{yc}^f} \\ \dfrac{\varepsilon_{zt}}{\varepsilon_{zt}^f} \text{或} \dfrac{\varepsilon_{zc}}{\varepsilon_{zc}^f} \\ \dfrac{|\varepsilon_{xy}|}{\varepsilon_{xy}^f} \\ \dfrac{|\varepsilon_{yz}|}{\varepsilon_{yz}^f} \\ \dfrac{|\varepsilon_{xz}|}{\varepsilon_{xz}^f} \end{cases} \tag{21-37}$$

式中，ξ_1 为应变失效准则的最大应变；$\varepsilon_{xt} = \max(0, \varepsilon_x)$；$\varepsilon_x$ 为层中 x 方向上的应变 $\varepsilon_{xc} = \min(0, \varepsilon_x)$；$\varepsilon_{xt}^f$ 为每一层中 x 方向拉伸的失效应变；ε_{xc}^f 为每一层中 x 方向压缩的失效应变；$\varepsilon_{yt} = \max(0, \varepsilon_y)$；$\varepsilon_y$ 为层中 y 方向上的应变；$\varepsilon_{yc} = \min(0, \varepsilon_y)$；$\varepsilon_{yt}^f$ 为每一层中 y 方向拉伸的失效应变；ε_{yc}^f 为每一层中 y 方向压缩的失效应变；$\varepsilon_{zt} = \max(0, \varepsilon_z)$；$\varepsilon_z$ 为层中 z 方向上的应变；$\varepsilon_{zc} = \min(0, \varepsilon_z)$；$\varepsilon_{zt}^f$ 为每一层中 z 方向的拉伸失效应变；ε_{zc}^f 为每一层中 z 方向的压缩失效应变；ε_{xy} 为层中 x–y 方向的切应变；ε_{xy}^f 为层中 x–y 方向的失效切应变；ε_{yz} 为层中 y–z 方向的切应变；ε_{yz}^f 为层中 y–z 方向的失效切应变；ε_{xz} 为层中 x–z 方向的切应变；ε_{xz}^f 为

层中 x–z 方向的失效切应变。

2．最大应力失效准则

该准则对应于后处理失效准则中的 Maximum Stress。

$$\varepsilon_2 = \max\begin{cases} \dfrac{\sigma_{xt}}{\sigma_{xt}^f} \text{或} \dfrac{\sigma_{xc}}{\sigma_{xc}^f} \\ \dfrac{\sigma_{yt}}{\sigma_{yt}^f} \text{或} \dfrac{\sigma_{yc}}{\sigma_{yc}^f} \\ \dfrac{\sigma_{zt}}{\sigma_{zt}^f} \text{或} \dfrac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zc}^f} \\ \dfrac{|\sigma_{xy}|}{\sigma_{xy}^f} \\ \dfrac{|\sigma_{yz}|}{\sigma_{yz}^f} \\ \dfrac{|\sigma_{xz}|}{\sigma_{xz}^f} \end{cases} \tag{21-38}$$

式中，ε_2 为应力失效准则的最大应力；$\sigma_{xt} = \max(0, \sigma_x)$；$\sigma_x$ 为层中 x 方向上的应力 $\sigma_{xc} = \min(0, \sigma_x)$；$\sigma_{xt}^f$ 为每一层中 x 方向拉伸的失效应力；σ_{xc}^f 为每一层中 x 方向压缩的失效应力；$\sigma_{yt} = \max(0, \sigma_y)$；$\sigma_y$ 为层中 y 方向上的应力；$\sigma_{yc} = \min(0, \sigma_y)$；$\sigma_{yt}^f$ 为每一层中 y 方向拉伸的失效应力；σ_{yc}^f 为每一层中 y 方向压缩的失效应力；$\sigma_{zt} = \max(0, \sigma_z)$；$\sigma_z$ 为层中 z 方向上的应力；$\sigma_{zc} = \min(0, \sigma_z)$；$\sigma_{zt}^f$ 为每一层中 z 方向拉伸的失效应力；σ_{zc}^f 为每一层中 z 方向压缩的失效应力；σ_{xy} 为层中 x–y 方向的切应力；σ_{xy}^f 为层中 x–y 方向的失效切应力；σ_{yz} 为层中 y–z 方向的切应力；σ_{yz}^f 为层中 y–z 方向的失效切应力。

3．Tsai–Wu 失效准则

该准则对应于后处理失效准则中的 Tsai–Wu Strength Index。

如果用强度下标表示

$$\xi_3 = A + B \tag{21-39}$$

式中，ξ_3 为 Tsai–Wu 失效准则值

$$A = -\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f} - \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f} - \frac{\sigma_z^2}{\sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f} + \frac{\sigma_{xy}^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} + \frac{\sigma_{yz}^2}{(\sigma_{yz}^f)^2} + \frac{\sigma_{xz}^2}{(\sigma_{xz}^f)^2} + \frac{C_{xy}\sigma_x\sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{yt}^f \sigma_{tc}^f}} + \frac{C_{yz}\sigma_y\sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}} + \frac{C_{xz}\sigma_x\sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}}$$

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{xt}^f} + \frac{1}{\sigma_{xc}^f}\right)\sigma_x + \left(\frac{1}{\sigma_{yt}^f} + \frac{1}{\sigma_{yc}^f}\right)\sigma_y + \left(\frac{1}{\sigma_{zt}^f} + \frac{1}{\sigma_{zc}^f}\right)\sigma_z$$

式中，C_{xy}、C_{yz}、C_{xz} 分别代表 x−y, y−z, x−z 的 Tsai−Wu 理论耦合系数。

4．强度比准则

该准则对应于后处理失效准则中的 Inverse of Tsai−Wu Strength Ratio Index。

如果使用强度比表示

$$\xi_3 = 1/\left(-\frac{B}{2A} + \sqrt{(B/2A)^2 + 1/A}\right) \quad (21-40)$$

21.6.4 单元表

单元表是对后处理获取计算结果的扩充，用户在完成对模型的计算后，可以在通用后处理或时间历程后处理中直接观察节点或单元的求解结果，这些结果是所有单元的通用求解结果。包括以下结果类型：位移（DOF Solution）、速度（Velocity）、加速度（Acceleration）、应力（Stress）、总的力学应变（Total Mechanical Strain）、弹性应变（Elastic Strain）、塑性应变（Plastic Strain）、蠕变（Creep Strain）、热应变（Thermal Strain）、总的力学和热应变（Total Mechanical and Thermal Strain）、膨胀应变（Swelling strain）、能量（Energy）、失效准则（Failure Criteria）、热梯度（Thermal Gradient）、热通量（Thermal Flux）和体积温度（Body Temperatures）。此外，每个单元还会产生特有的求解结果。这时，用户可以借助单元表观察其计算结果。

1．单元表观察结果的步骤

（1）定义单元表

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table，弹出单元表数据面板（Element Table Date），单击“Add”按钮，弹出定义附加单元表数据项面板，如图 21-37 所示，在该面板上有两个输出项和两个选择项，输入项包括为有效等效应变定义一个有效泊松比（Eff NU for EQV strain）和定义单元表变量名（User label for item）；两个选择项包括一级选择项（面板的左下方）和二级选择项（面板的右下方）。例如，用户在第一级结果选择通过序号查看，然后在第二级选择 SMISC 并输入恰当的序列号，单击“OK”按钮。单元序列号的选择和查看会在下面详细讲解。

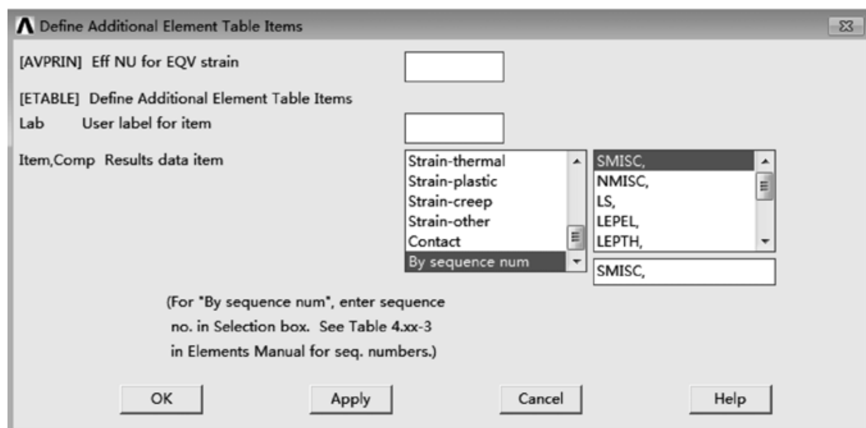


图 21-37 定义附加单元表数据项面板

（2）通过图形显示单元结果

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Element Table→Plot Elem Table，弹出图形显示单元表变量结果面板，如图 21-38 所示，该面板包括两个选项：选择单元表变量（Item to be Plotted）和是否在共有节点出平均计算结果（Average at common nodes）。

（3）通过列表观察单元结果

GUI：单击 Main Menu→General Postproc→Element Table→List Elem Table，弹出列表显示单元结果面板，如图 21-39 所示，用户可以在面板选择框内选项需要进行列表操作的单元表变量，单击“OK”按钮。

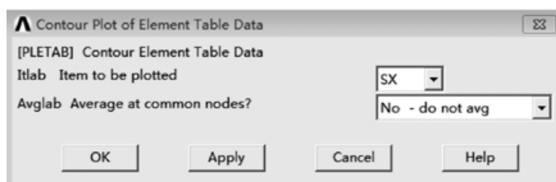


图 21-38　图形显示单元变量结果面板

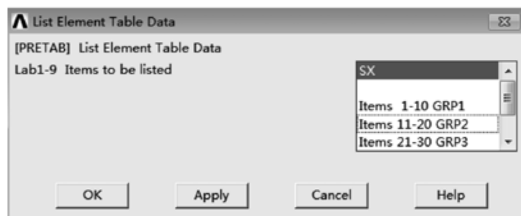


图 21-39　列表显示单元结果面板

2. 常用单元表

表 21-3 和表 21-4 给出了 LINK180 和 BEAM188 单元部分单元表，下面介绍查看方法。例如，观察 LINK180 的轴应力，则在图 21-39 中首先选择通过序列号查看（By sequence num），然后在右侧对话框，选择 LS 表示使用 LINK180 单元表中的 LS 项，然后在 LS 后输入 1，2 表示单元项后对应的 I 和 J 值，单击“OK”按钮，则用户就可以通过图形和列表进行观察。其他单元表数据的查看方法也是一样的，用户可以通过 ANSYS 的帮助文件查看每个单元的单元表，然后根据需要进行查看。

表 21-3　LINK180 单元表

输出参数	含义	单元表输入			
		Item	E	I	J
Sxx	轴应力	LS	—	1	2
EPELxx	轴向弹性应变	LEPEL	—	1	2
EPTOxx	总应变	LEPTO	—	1	2
EPTHxx	轴向热应变	LEPTH	—	1	2

表 21-4　BEAM188 单元表

输出参数	含义	单元表输入		
		Item	I	J
Fx	轴向力	SMISC	1	14
My,	y 方向弯矩	SMISC	2	15
Mz	z 方向弯矩	SMISC	3	16
TQ	扭矩	SMISC	4	17
SFz	截面 z 方向剪力	SMISC	5	18
SFy	截面 y 方向剪力	SFy	SMISC	6

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

打造 CAD 图书领域的“中国制造”

丛书特色

- **历久弥新**：为响应国家“两化融合”的号召，机工社历经十年倾力打造本系列丛书，丛书每年重印率达 90%、改版率达 50%，已成为国内 CAD 图书领域的最经典套系之一。
- **专业实用**：丛书内容涉及机械设计、有限元分析、制造技术应用、流场分析、建筑施工图、室内装潢图、水暖电布线图和建筑总图等，可以快速有效地帮助读者解决实际工程问题。
- **品种丰富**：本丛书目前动销品种近 200 种，产品包含了 CAX 领域全部主流应用软件和应用领域，包括 AutoCAD，UG，Pro/E，MATLAB，SolidWorks，HyperWorks，ANSYS，Mastercam，Inventor 等。
- **经典畅销**：经典畅销书层出不穷，累计销售过万册的品种达数十种。像《AutoCAD 室内装潢设计》、《UG NX 7.5 完全自学手册》、《Pro/ENGINEER Wildfire5.0 从入门到精通》、《ANSYS 结构分析工程应用实例解析》等书整体销量已过 3 万册。
- **配套资源丰富**：几乎每本书都提供配有书中实例素材、操作视频、PPT 课件等资源，方便读者的理解和学习，以达到事半功倍的效果。
- **金牌作者云集**：拥有一大批行业专家和畅销书作者，如唐湘民、韩凤起、钟日铭、江洪、张朝晖和张忠将等。

丛书介绍



书名：UG NX 8.0完全自学手册 第2版

书号：978-7-111-38414-4

作者：钟日铭 等

定价：75.00元

★本书以UG NX 8.0中文版为软件操作基础，结合典型范例循序渐进地介绍NX 8.0中文版的软件功能和实战应用知识。本书知识全面、实用，共分9章，内容包括UG NX 8.0入门简介及基本操作、草图、空间曲线与基准特征、创建实体特征、特征操作及编辑、曲面建模、装配设计、工程图设计、UG NX中国工具箱应用与同步建模。



书名：SolidWorks 2011机械设计完全实例教程
书号：978-7-111-36514-3
作者：张忠将 等
定价：62.00元

★本书紧密结合实际应用，以众多精彩的机械设计实例为引导，详细介绍了SolidWorks从模型创建到出工程图，再到模型分析和仿真等的操作过程。本书实例涵盖典型机械零件、输送机械、制动机械、农用机械、紧固和夹具、传动机构和弹簧/控制装置等的设计。



书名：HyperMesh&HyperView应用技巧与高级实例
书号：978-7-111-39535-5
作者：王钰栋 等
定价：99.00元

★本书分两部分，前一部分主要介绍HyperMesh有限元前处理软件，包括HyperMesh的基础知识、几何清理、2D网格划分、3D网格划分、1D单元创建、航空应用和主流求解器接口介绍，还包括关于HyperMesh的用户二次开发功能。后一部分主要介绍HyperView、HyperGraph等有限元后处理软件，包括用HyperView查看结果云图、变形图、结果数据、创建截面、创建测量点、报告模板等，用HyperGraph建立数据曲线、曲线的数据处理和三维曲线曲面的创建、处理等。



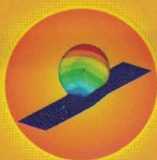
书名：奥宾学院大师系列：AutoCAD MEP 2011
书号：978-7-111-39432-7
作者：[美]Paul F. Aubin 等著；王申 等译
定价：129.00元

★本书是目前国内针对 AutoCAD®MEP 软件介绍、应用举例的权威用书，深入浅出地阐述了 AutoCAD®MEP 2011 的各项功能，对AutoCAD MEP 软件的工作方法、基本原理和操作步骤进行了详细的介绍，并通过项目样例系统地介绍了如何使用该软件进行水、暖、电设计，更简明扼要地展示了如何进行各专业之间的协同。本书还特别介绍了如何创建各种类型的内容构件，字里行间的提示和小技巧亦是本书亮点之一，这些知识点均由本书作者通过积累多年的实战经验总结而成，为广大读者的实践旅程提供了捷径。

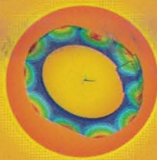
在线互动交流平台

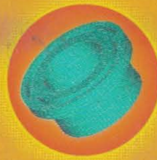
官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆瓣网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS 14.0工程实例解析与常见问题解答









SolidWorks系列
AutoCAD系列
Pro/E系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

>>》>ANSYS系列已出版<《<<

- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-41679-1

策划编辑◎张淑谦/封面设计◎



子时文化 ZiShi Culture



定价：69.00元（含1DVD）